

Grado en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación



Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

TRABAJO FIN DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIONES DE FORMA DE ONDA PARA 5G

Autor: Claudiu Eugen Bota

Tutora: Ana García Armada

Co-tutor: Kun Chen Hu

Leganés, Septiembre 2017

TÍTULO: Implementación y simulaciones de forma de onda para 5G

AUTOR: Claudiu Eugen Bota

TUTORA: Ana García Armada

CO-TUTOR: Kun Chen Hu

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día ____
de _____ del 20____ en Leganés, en la Escuela Politécnica
Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la
CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento hacia mis padres. Quiero agradecer su sacrificio a lo largo de todos estos años y su esfuerzo para permitirme estudiar una carrera en la universidad. Ellos han sido fundamentales en los malos momentos para animarme a seguir adelante y para enseñarme cuál es el camino a seguir. Son las personas que más admiro por su humildad, su perseverancia y su optimismo, y son la clase de persona que quiero ser. Me faltan palabras para expresar mi gratitud por todo lo que han hecho por mí.

En segundo lugar, quiero dar las gracias a mis amigos y compañeros de la universidad, ya que sin ellos no estaría donde estoy. Gracias por las risas en época de exámenes y por el apoyo todos estos años.

Finalmente, quiero agradecer a mi tutora y especialmente al co-tutor Kun Chen Hu por la paciencia que ha tenido y por toda su ayuda a lo largo de la realización de este trabajo.

Resumen

La comunicación ha resultado imprescindible para el ser humano a lo largo de la historia. Desde la prehistoria hasta la actualidad, la comunicación ha jugado un papel muy importante en diversas áreas como por ejemplo el comercio, el ámbito militar, o la educación. Con el paso del tiempo aparecieron ciertos retos o dificultades como por ejemplo la necesidad de que la comunicación pueda darse cuando el emisor o el receptor estén en movimiento o que la comunicación se dé a grandes distancias. Esto provocó el desarrollo de sistemas de comunicaciones móviles basados en la comunicación vía radio.

Debido al aumento del número de usuarios de teléfonos móviles surge la obligación de evolucionar los sistemas de comunicaciones para poder cubrir sus necesidades. **Long Term Evolution** (LTE) aparece como una opción para cumplir con dicha misión. LTE utiliza para su enlace de bajada la modulación **Orthogonal Frequency Division Multiplexing** (OFDM) y para su enlace de subida la modulación **Single-carrier FDMA** (SC-FDMA).

En este trabajo se van a realizar una implementación y una simulación de las modulaciones utilizadas en LTE además de **Universal Filtered Multi-Carrier** (UFMC), **Single Carrier UFMC** (SC-UFMC) y una modulación derivada de OFDM, **Masked OFDM** o m-OFDM mediante la utilización de varios **Universal Software Radio Peripheral** (USRP) de National Instruments. Se van a utilizar dos USRPs: uno en transmisión y otro en recepción.

Primero, lo que se realiza es una mejora a una implementación de las modulaciones OFDM y m-OFDM ya hecha. Dicha mejora consiste en utilizar el programa Openair Interface para enviar una señal en banda ancha añadiéndola a una señal en banda estrecha o Narrow Band (NB) generada mediante Labview y transmitida usando uno de los USRPs. Así, se consigue una modulación **NarrowBand IOT** (NB-IoT).

De esta forma, se sustituye la banda ancha generada anteriormente mediante Labview y transmitida mediante otro USRP por una señal OFDM o m-OFDM generada con Openair. Posteriormente, se compararán los resultados obtenidos con ambas modulaciones.

Para poder realizar esto, es necesario generar la arquitectura típica de LTE mediante Openair Interface en dos ordenadores y desplegar una red. Además, para comprobar la funcionalidad de esta red se va a conectar un dispositivo móvil mediante una tarjeta SIM grabada previamente y se va a comprobar que es posible el acceso a internet.

Además de esto, se posibilita reducir el tamaño de las FFT/IFFT aplicadas lo que consigue aumentar la frecuencia de muestreo y, en consecuencia, el ancho de banda de las subportadoras.

En cuanto a las modulaciones SC-FDMA, SC-UFMC y UFMC, se realiza la implementación del transmisor y se usa un USRP para transmitir dichas señales mediante Labview. Posteriormente, se hará una comparación entre dichas señales transmitidas en banda ancha con una señal en banda ancha OFDM, analizando las diferencias.

A nivel de simulación, se aumenta a dos el número de modulaciones para modular los bits: 4-QAM y 16-QAM (**Quadrature Amplitude Modulation**) y se realizarán simulaciones para OFDM, SC-FDMA, SC-UFMC y UFMC.

Se van a analizar las prestaciones de las tres modulaciones para las distintas modulaciones de bits, así como el efecto de reducir el tamaño de las FFT/IFFT aplicadas en OFDM. Además, se van a explicar los principales bloques del código programado.

Finalmente, se procederá a medir la **Peak-to-Average Power Ratio** (PAPR) en el transmisor y la **Bit Error Rate** (BER) y la **Symbol Error Rate** (SER) en el receptor. En el primer caso se hará para las modulaciones OFDM, SC-FDMA y SC-UFMC, y en el segundo caso se hará para la mejora aplicada a OFDM y m-OFDM.

Índice

Implementación y simulación de formas de onda para 5G.....	1
El tribunal.....	3
Agradecimientos.....	5
Resumen.....	7
Índice.....	10
Índice de ilustraciones.....	13
Índice de tablas.....	15
Acrónimos.....	16
1. Introducción.....	19
1. Antecedentes.....	21
2. Motivación.....	21
3. Objetivos.....	22
4. Diagrama de Gantt.....	23
5. Estructura de la memoria.....	23
2. Análisis de las formas de onda.....	26
1. Antecedentes.....	28
1. FDMA.....	28
2. TDMA.....	28
3. CDMA.....	29
2. OFDM.....	29
3. Masked OFDM.....	38
4. NB-IoT.....	38
5. SC-FDMA.....	39
6. UPMC.....	40
7. SC-UPMC.....	43

3. Openair Interface.....	45
1. Introducción a Openair Interface.....	47
2. Arquitectura LTE.....	47
1. E-UTRAN.....	47
2. EPC.....	49
3. Instalación y configuración.....	50
4. Generación de la señal en banda ancha.....	50
4. Código, simulación e implementación.....	52
1. Mejoras OFDM, m-OFDM y NB-IoT.....	54
1. Simulación OFDM.....	54
2. Implementación real OFDM, m-OFDM y NB-IoT.....	54
2. Sistema de comunicaciones basado en SC-FDMA.....	54
1. Transmisor.....	54
2. Receptor.....	59
3. Sistema de comunicaciones basado en UFMC y SC-UFMC.....	60
5. Resultados.....	65
1. Mejora mediante OAI.....	67
2. SC-FDMA y UFMC.....	71
3. Resultados simulación.....	73
1. Simulación OFDM.....	73
2. Simulación SC-FDMA.....	75
3. Simulación SC-UFMC.....	76
6. Conclusión, líneas de trabajo futuras y dificultades.....	78
1. Conclusiones.....	80
2. Líneas de trabajo futuras.....	80
3. Dificultades.....	80

7. Marco regulador, impacto socio-económico y presupuesto.....	83
1. Entorno socio-económico.....	85
1. Presupuesto y costes.....	85
1. Coste del material.....	85
2. Coste del personal.....	86
3. Coste total.....	86
2. Impacto socio-económico.....	86
2. Marco regulador.....	87
Referencias.....	90
Summary.....	92

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Evolución de las redes móviles.....	21
Ilustración 2: Diagrama de Gantt.....	23
Ilustración 3: FDMA.....	28
Ilustración 4: TDMA.....	29
Ilustración 5: CDMA.....	29
Ilustración 6: Bloque de recursos en LTE.....	30
Ilustración 7: Ahorro de ancho de banda.....	31
Ilustración 8: Multipath.....	32
Ilustración 9: Prefijo cíclico.....	33
Ilustración 10: Diagrama de bloques OFDM.....	34
Ilustración 11: Error de sincronización de símbolo.....	36
Ilustración 12: Estructura de símbolos de piloto.....	37
Ilustración 13: NB-IoT.....	39
Ilustración 14: Diagrama de bloques SC-FDMA.....	40
Ilustración 15: Modos SC-FDMA.....	40
Ilustración 16: Subbandas UFMC.....	41
Ilustración 17: Diagrama de bloques UFMC.....	42
Ilustración 18: Arquitectura LTE.....	47
Ilustración 19: Arquitectura E-UTRAN.....	48
Ilustración 20: Transmisor SC-FDMA.....	56
Ilustración 21: Constelación SC-FDMA.....	57
Ilustración 22: Parámetros de control SC-FDMA.....	58
Ilustración 23: Filtro conformador SC-FDMA.....	58
Ilustración 24: Adición secuencia entrenamiento.....	59
Ilustración 25: Señal transmitida SC-FDMA.....	59

Ilustración 26: Receptor SC-FDMA.....	60
Ilustración 27: Generación filtros más selección.....	61
Ilustración 28: Transmisor SC-UFMC.....	62
Ilustración 29: Receptor SC-UFMC 1.....	62
Ilustración 30: Receptor SC-UFMC 2.....	63
Ilustración 31: Señal banda estrecha OFDM.....	67
Ilustración 32: Constelación señal banda estrecha OFDM.....	67
Ilustración 33: Señal NB + BB OFDM.....	68
Ilustración 34: Constelación señal NB + BB OFDM.....	68
Ilustración 35: Medición osciloscopio NB + BB OFDM.....	69
Ilustración 36: Señal NB + BB m-OFDM.....	70
Ilustración 37: Constelación NB + BB m-OFDM.....	70
Ilustración 38: Medición osciloscopio NB + BB m-OFDM.....	71
Ilustración 39: Comparación espectro SC-FDMA y OFDM.....	72
Ilustración 40: Comparación espectro UFMC y OFDM.....	72
Ilustración 41: Comparación espectro UFMC y OFDM 2.....	73
Ilustración 42: Espectro OFDM N=1024 y Nsc=600.....	74
Ilustración 43: Espectro OFDM N=512 y Nsc=300.....	74
Ilustración 44: Espectro OFDM N=256 y Nsc=150.....	74
Ilustración 45: Simulación SC-FDMA.....	75
Ilustración 46: Constelación SC-FDMA.....	75
Ilustración 47: Simulación SC-UFMC.....	76
Ilustración 48: Constelación SC-UFMC.....	76
Ilustración 49: Gantt diagram.....	94

Índice de tablas

Tabla 1: Coste del material.....85

Tabla 2: Coste total.....86

Tabla 3: Material cost.....97

Tabla 4: Total cost.....98

Acrónimos

LTE: Long Term Evolution

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

SC-FDMA: Single-carrier FDMA

UFMC: Universal Filtered Multi-Carrier

SC-UFMC: Single Carrier UFMC

M-OFDM: Masked OFDM

USRP: Universal Software Radio Peripheral

OAI: Openair Interface

NB-IoT: Narrow Band Internet of Things

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

PAPR: Peak-to-Average Power Ratio

BER: Bit Error Rate

SER: Symbol Error Rate

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access

FDD: Frequency Division Duplexing

TDD: Time Division Duplexing

CP: Cyclic Prefix

FFT: Fast Fourier Transform

FDMA: Frequency Division Multiple Access

TDMA: Time Division Multiple Access

CDMA: Code Division Multiple Access

OFDMA: Orthogonal frequency-division multiple access

AWGN: Additive white Gaussian noise

DFT: Discrete Fourier Transform

DAC: Digital-to-analog converter

ADC: Analog-to-digital converter

ZF: Zero Forcing

OBE: Out-of-Band Emissions

E-UTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

EPC: Evolved Packet Core

UE: User Equipment

S-GW: Serving GateWay

MME: Mobility Mangement Entity

P-GW: PDN-Gateway

PCRF: Policy Control and Charging Rules Function

GMLC: Gateway Mobile Location Centre

HSS: Home Subscriber Server

E-SMLC: Evolved Serving Mobile Location Centre

ITU-R: International Telecommunication Union Radiocommunication

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado superarse y conseguir realizar actos que a priori parecerían imposibles. A través del conocimiento y la perseverancia, se ha conseguido que actividades muy difíciles se alcancen de manera sencilla.

Las telecomunicaciones también se han visto afectadas por el afán de superación del ser humano. Las primeras formas de comunicación a distancia fueron sencillas, tales como las señales de humo o el uso de cuernos en el ámbito militar. Posteriormente, se desarrollaron nuevos sistemas de comunicaciones, tales como el telégrafo hidráulico, el correo postal o el telégrafo óptico. Sin embargo, la aparición del telégrafo eléctrico supuso un gran avance en materia de telecomunicación. Al telégrafo le siguieron el teléfono, la radiocomunicación y, posiblemente la mayor aportación al mundo de la comunicación a distancia, Internet.

Los sistemas de comunicaciones móviles surgen debido a la necesidad de poder realizar una comunicación que permita la movilidad del emisor o del receptor. Los primeros sistemas de comunicaciones móviles estaban enfocados hacia las llamadas de voz pero con el paso del tiempo, el uso de los datos móviles se vio incrementado exponencialmente. Además, el número de usuarios de este tipo de sistemas de comunicaciones ha crecido de manera desorbitada. LTE surge como una tecnología que busca satisfacer dichas necesidades entre otras muchas (mayor capacidad, velocidad, eficiencia, movilidad, etc.).

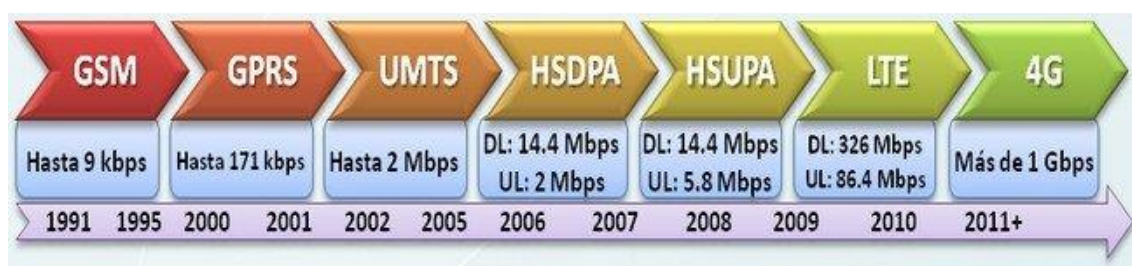


Ilustración 1: Evolución de las redes móviles

1.2. Motivación

LTE se plantea como la evolución de **Universal Mobile Telecommunications System** (UMTS), pero con unos rendimientos superiores. A diferencia de UMTS, LTE tan solo soporta Conmutación de Paquetes, y no Conmutación de Circuitos. De esta manera, los recursos no son reservados de forma fija para un usuario sino que se reparten. Además, LTE utiliza OFDM y SC-FDMA para los enlaces descendente y ascendente respectivamente en lugar de **Wideband Code Division Multiple Access** (WCDMA), utilizada en UMTS. Las constelaciones que se pueden usar son 4-QAM, 16-QAM, y 64-QAM, tanto para enlace ascendente y descendente, siendo la 64-QAM opcional en el enlace de subida. Además, permite tanto **Frequency Division Duplexing** (FDD) como **Time Division Duplexing** (TDD), y se asume la misma celda para el enlace de bajada y para el de subida.

Este trabajo pretende hacer una implementación similar a LTE, analizando las diferentes modulaciones utilizadas en los enlaces de subida y de bajada típicos de esta tecnología. Se van a probar las modulaciones típicas de LTE: OFDM y SC-FDMA. Además, como una mejora, se van a probar las modulaciones UFMC y SC-UFMC basadas en el uso de filtros, y las mejoras de OFDM: m-OFDM y NB-IoT. Para poder tener una visión más completa de LTE, se van a probar las dos constelaciones más usadas que son 4-QAM y 16-QAM.

1.3. Objetivos

Debido a la cantidad de modulaciones tanto de la señal como de los bits los objetivos son varios. El primer objetivo es implementar todos los bloques necesarios para poder realizar la conexión física entre los USRPs. Esto consiste en realizar un programa mediante Labview para que los USRPs puedan transmitir y recibir datos mediante las antenas.

El segundo objetivo es implementar los bloques que llevan a cabo la modulación de los datos transmitidos dentro del mismo programa creado anteriormente. Será necesario implementar la modulación de los bits según que constelación se quiera (4-QAM o 16-QAM), la inserción de los pilotos o la adición del **prefijo cíclico** (CP) entre otros. Además, en función de la modulación utilizada se deberán realizar más o menos bloques.

Por ejemplo, en el caso de las modulaciones SC-FDMA y SC-UFMC se deberá añadir un bloque que realice la **Transformada rápida de Fourier** (FFT) para cada uno de los usuarios. Incluso, para el caso de SC-UFMC y UFMC, se deberá generar el filtro adecuado con Matlab y desplazarlo en frecuencia en función de la banda de frecuencias donde se encuentre el usuario.

El tercer objetivo, será generar el receptor y adaptarlo en función de la modulación utilizada. Será necesario implementar todos los bloques necesarios para la sincronización, la detección, la decodificación de los datos, la demodulación o la estimación del canal entre otros. Así mismo, se tendrá que generar los bloques que calculen la SER y la BER de todas las posibles combinaciones descritas con anterioridad.

El cuarto objetivo es utilizar el programa Openair Interface para generar la señal de banda ancha para las modulaciones OFDM y m-OFDM y realizar los mismos experimentos mencionados antes, calculando igualmente la BER y la SER.

El quinto objetivo es realizar una implementación clara, sencilla y completa, que satisfaga los requerimientos y que sea fácil de entender e intuir.

Por último, el objetivo final será obtener unos resultados aceptables en cuanto a la BER y la SER en todos los casos, así como realizar una comparación entre todas las posibles combinaciones.

1.4. Diagrama de Gantt

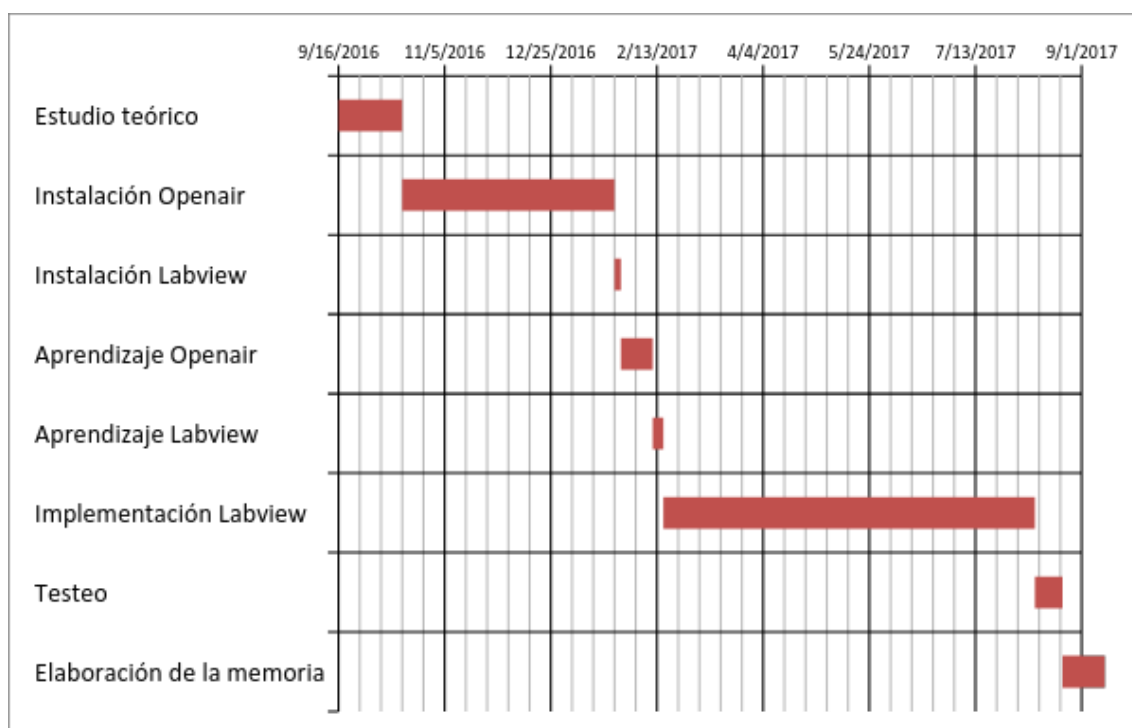


Ilustración 2: Diagrama de Gantt

1.5. Estructura de la memoria

-Capítulo 1: Introducción

Este capítulo es una introducción al trabajo desarrollado. Incluye un breve resumen de la historia de las telecomunicaciones hasta llegar a LTE, la motivación del trabajo, así como los objetivos a alcanzar. Así mismo, presenta un diagrama de Gantt explicando la planificación llevada a cabo y se describe la estructura seguida al escribir la memoria.

-Capítulo 2: Análisis de las formas de onda

En este capítulo se explicará toda la teoría relacionada con OFDM, m-OFDM, NB-IoT, SC-FDMA, UPMC y SC-UPMC, sus orígenes, sus aplicaciones, sus carencias, así como la estructura de los sistemas de comunicaciones basados en estas modulaciones.

-Capítulo 3: Openair Interface

En este capítulo se desarrollará la instalación de Openair Interface, la arquitectura de LTE implementada, además de otras cuestiones relacionadas con este programa.

-Capítulo 4: Código, simulación e implementación

En este capítulo se mostrarán los bloques principales del código desarrollado para las distintas modulaciones, y se explicará en qué consisten las implementaciones y las simulaciones realizadas.

-Capítulo 5: Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos con la mejora desarrollada mediante Openair Interface comparándolos con los resultados anteriores, se compararán los espectros de las modulaciones SC-FDMA y SC-UFMC con el espectro de OFDM, y finalmente, se mostrarán los resultados de las simulaciones realizadas.

-Capítulo 6: Conclusiones, líneas de trabajo futuras y dificultades

Este capítulo tratará sobre las conclusiones extraídas de los resultados obtenidos, así como sobre las líneas de trabajo futuras basadas en este proyecto. Finalmente, se expondrán las principales dificultades encontradas a lo largo del proyecto.

-Capítulo 7: Marco regulador, impacto socio-económico y presupuesto

Este capítulo tratará sobre el marco regulador del trabajo, su impacto socio-económico y el presupuesto necesario para llevarlo a cabo.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE LAS FORMAS DE ONDA

2.1. Antecedentes

Debido a que el ancho de banda es un recurso escaso hay que realizar un uso eficiente del mismo. Por ello, se han desarrollado distintos métodos de acceso múltiple que permite que varios usuarios hagan uso de los mismos recursos de forma compartida. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran:

- Acceso múltiple por división de frecuencia o FDMA (**Frequency Division Multiple Access**)
- Acceso múltiple por división de tiempo o TDMA (**Time Division Multiple Access**)
- Acceso múltiple por división de código o CDMA (**Code Division Multiple Access**)

2.1.1. FDMA

FDMA es una técnica de acceso múltiple que asigna a cada usuario una o varias bandas de frecuencias de forma individual. Además, presenta una ventaja frente a TDMA, ya que no se ve afectado por los problemas de sincronización.

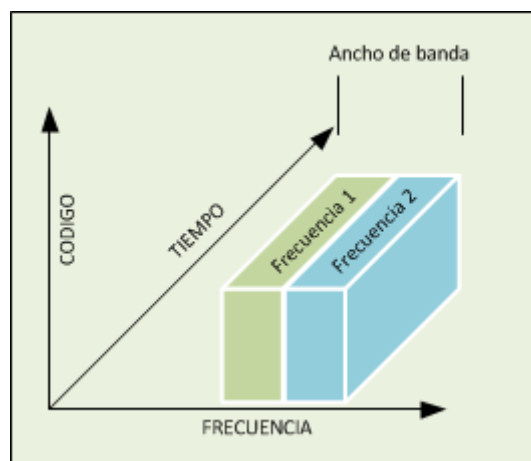


Ilustración 3: FDMA

2.1.2. TDMA

TDMA es un método de acceso múltiple basado en la multiplexación por división de tiempo (TDM o **Time Division Multiplexing**). Permite que varios usuarios puedan usar la misma banda de frecuencia dividiendo la señal en intervalos de tiempo o slots.

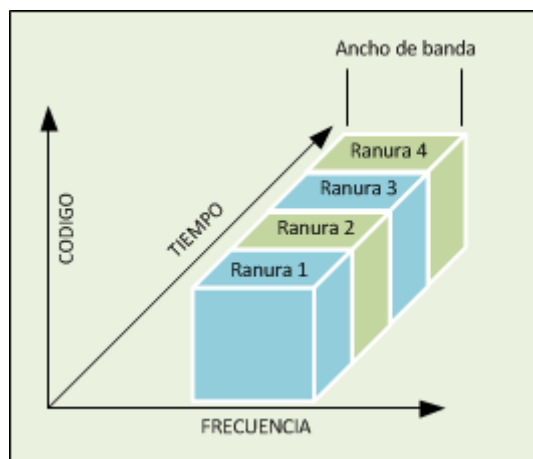


Ilustración 4: TDMA

2.1.3. CDMA

CDMA es un método de acceso que permite transmitir información a varios usuarios de forma simultánea mediante un único canal de comunicación. De esta manera, pueden transmitir al mismo tiempo y usando la misma banda de frecuencia. Para que esto pueda ocurrir sin que se dé interferencia entre usuarios, CDMA hace uso del espectro ensanchado y de unos códigos únicos para cada usuario.

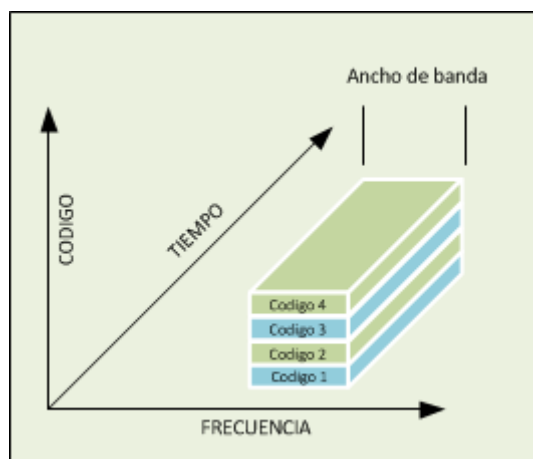


Ilustración 5: CDMA

2.2. OFDM

Orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA) pretende adaptar la técnica de transmisión **Orthogonal Frequency Division Multiplexing** (OFDM) para lograr un sistema de comunicación multiusuario. OFDMA distribuye las subportadoras a diferentes usuarios de forma que puedan recibir información simultáneamente.

OFDMA para comunicaciones móviles se propuso inicialmente basándose en FDMA, que asigna a un usuario un conjunto aleatorio de subportadoras. Además, OFDMA se puede usar en combinación con TDMA de forma que los recursos se reparten en el plano tiempo-frecuencia en grupos de subportadoras de una duración específica en el tiempo. En LTE, estas particiones se denominan Bloques de Recursos (Resources Blocks / RBs). Un intervalo de tiempo en una subportadora representa un símbolo OFDM. Cada símbolo contiene datos modulados y la modulación puede ser distinta para cada símbolo.

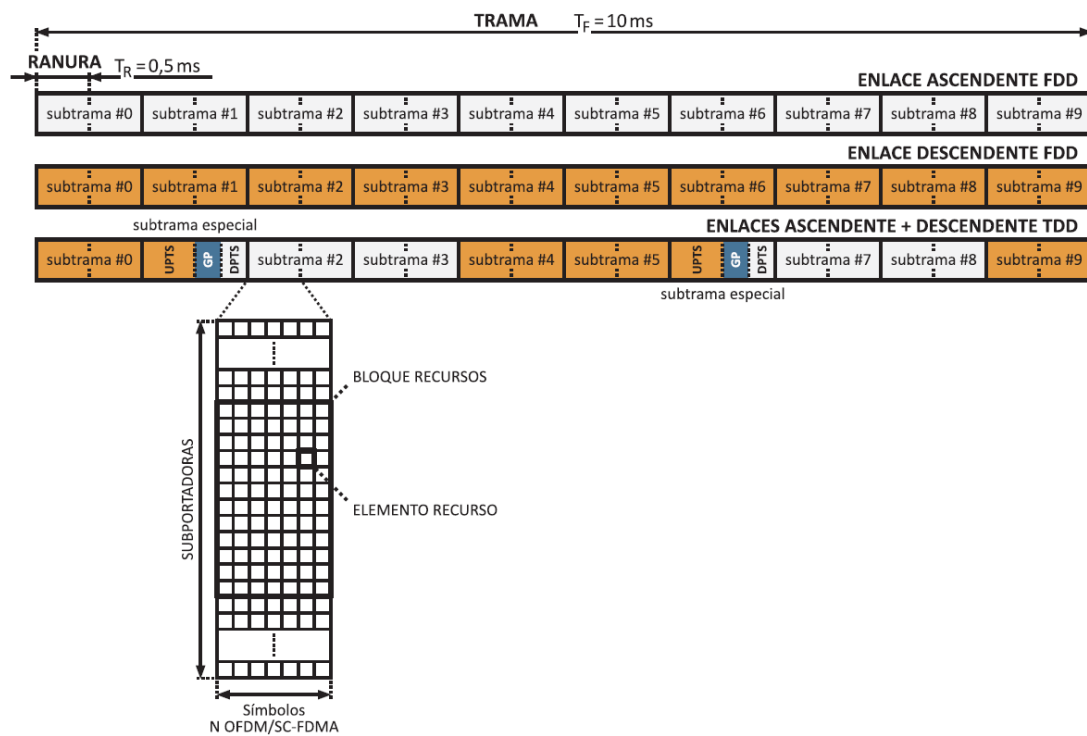


Ilustración 6: Bloque de recursos en LTE

OFDM es una técnica de transmisión multiportadora basada en la **multiplexación por división de frecuencia** (FDM) pero en el que las subportadoras son ortogonales entre sí y se usan para transmitir datos en varios canales paralelos. Al utilizar múltiples subportadoras, se transmite un bloque de N símbolos en paralelo en un intervalo de $T = N T_S$ segundos, en vez de transmitir un bloque de N símbolos en serie, donde cada símbolo se envía cada T_S , siendo T_S el periodo de símbolo en segundos. De esto se extrae que la tasa $R_{S\text{ OFDM}} = R_S / N$ donde $R_S = \frac{1}{T_S}$. Por tanto, en vez de usar una sola portadora se utilizan múltiples portadoras para un mismo ancho de banda, mejorando así la eficiencia espectral.

Al ser las portadoras ortogonales entre sí, se elimina la necesidad de utilizar guardas para separar las portadoras y se mejora la eficiencia espectral. La separación entre las subportadoras es tal que pueden ser separadas fácilmente en la recepción. Esto permite que se reduzca la complejidad del receptor, lo que hace que OFDM sea muy atractivo para la transmisión de grandes volúmenes de datos, como por ejemplo, en el enlace descendente de LTE.

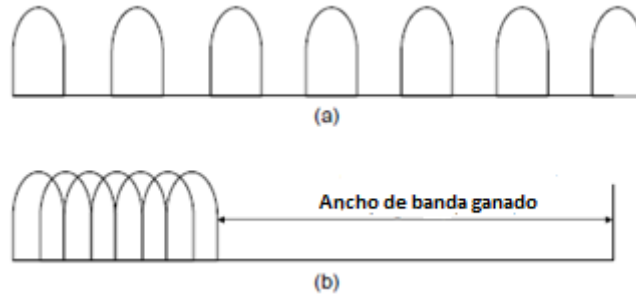


Ilustración 7: Ahorro de ancho de banda

Las portadoras son señales ortogonales pero que se escogen de tal manera que permitan simplificar la implementación del sistema OFDM. Supongamos dos subportadoras $\Phi_u(t)$ y $\Phi_v(t)$ del tipo:

$$\Phi_u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect} \left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T} \right) \exp (2\pi f_u t)$$

$$\Phi_v(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect} \left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T} \right) \exp (2\pi f_v t)$$

A continuación se va a comprobar que condiciones deben cumplir para ser ortogonales.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_u \Phi_v^* dt = \frac{1}{T} \int_0^T \exp \left[2\pi(u - v) \frac{t}{T} \right] dt$$

Esta ecuación será 1 si $u = v$, y en cualquier otro caso será 0.

Por tanto, para que haya ortogonalidad es necesario que u sea distinta de v . Como se puede observar, la mínima distancia para que se dé la ortogonalidad es $u - v = 1$. Por tanto, las subportadoras se escogen de tal manera que estén equiespaciadas $\Delta f = \frac{1}{T}$ Hz.

Como se puede observar en la ecuación, las subportadoras son ortogonales en el intervalo $[0, T]$. Pero dado que es necesario tener ortogonalidad siempre, cada subportadora se multiplica por una función ventana que típicamente es un filtro de conformación de pulso rectangular. En el caso de la implementación realizada, se ha escogido un filtro en raíz de coseno alzado.

Se definen ahora N subportadoras con la siguiente expresión:

$$\Phi_k(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect} \left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T} \right) \exp (2\pi \Delta f_k t) \quad k = 0, 1, \dots, N - 1$$

Donde N es el número de subportadoras. El hecho de que no se tenga en cuenta la fase inicial de la portadora se debe a que, generalmente, se establece un offset fijo de forma que la señal en paso banda se centra alrededor de la frecuencia central. Este offset fijo es $e^{-j\pi(N-1)\frac{t}{T}}$ y no se mostrará en el diagrama del modulador OFDM en tiempo continuo.

Los datos se transmiten en bloques de N símbolos paralelos $c_l = [c_{0,l}, c_{1,l}, \dots, c_{N-1,l}]$ con tasa de símbolo $R_S = \frac{1}{T_S}$. Una vez explicado esto, se puede plantear la ecuación del símbolo OFDM:

$$x_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_{k,l} \Phi_k(t - lT)$$

Donde $c_{k,l}$ es el k -ésimo símbolo de la k -ésima subportadora del l -ésimo símbolo OFDM y $x_l(t)$ es el símbolo OFDM generado en el l -ésimo periodo de símbolo T . Asumiendo una transmisión continua, se obtiene:

$$x(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} c_{k,l} \Phi_k(t - lT)$$

La señal transmitida puede llegar al receptor por múltiples caminos de distinta longitud. Esto se debe a la presencia de obstáculos, y genera que al receptor llegue la suma de todas las señales con sus distintos retrasos. Este fenómeno se denomina multitrayecto.

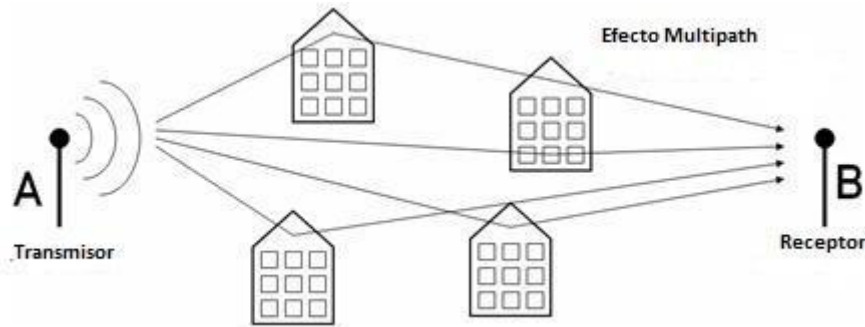


Ilustración 8: Multipath

El canal, en este caso, es un canal variante con el tiempo y con desvanecimiento multitrayecto, cuya respuesta al impulso se puede expresar por $h(\tau, t)$. Además, hay que tener en cuenta el ruido blanco gaussiano o **Additive white Gaussian noise** (AWGN) $n(t)$.

Debido a que la respuesta del canal está limitada al intervalo $[0, \tau_{max}]$, la integral se realiza dentro del mismo intervalo, donde τ_{max} es el máximo retraso del canal. Para poder simplificar las operaciones, se considera un canal invariante con el tiempo durante la transmisión del k -ésimo símbolo OFDM, de forma que $h(\tau, t)$ pasa a ser $h(t)$. La señal recibida queda así:

$$r(t) = h(\tau; t) * x(t) + n(t) = \int_0^{\tau_{max}} h(\tau) x(t - \tau) d\tau + n(t)$$

Debido al desvanecimiento multitrayecto se produce **Interferencia Intersimbólica** (ISI). Para poder paliarla, es necesario introducir unas bandas de guarda al comienzo de los símbolos OFDM. Estas bandas de guarda deben ser mayores que τ_{max} . Sin embargo, esto genera **Interferencia entre portadoras** (ICI) y por tanto, es necesario incluir dentro de estas bandas de guarda un **Prefijo Cíclico** (CP).

El CP está compuesto por las últimas muestras del símbolo OFDM que se añaden al comienzo del símbolo y su propósito es evitar la superposición de símbolos individuales. En recepción, este CP se elimina. Una vez introducido el CP, la función que define las subportadoras queda así:

$$\theta_k(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T_e}{2}}{T_e}\right) e^{j2\pi \Delta f_k (t - T_{cp})} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

Donde $T_e = T + T_{CP}$ que es el periodo extendido una vez añadido el CP.

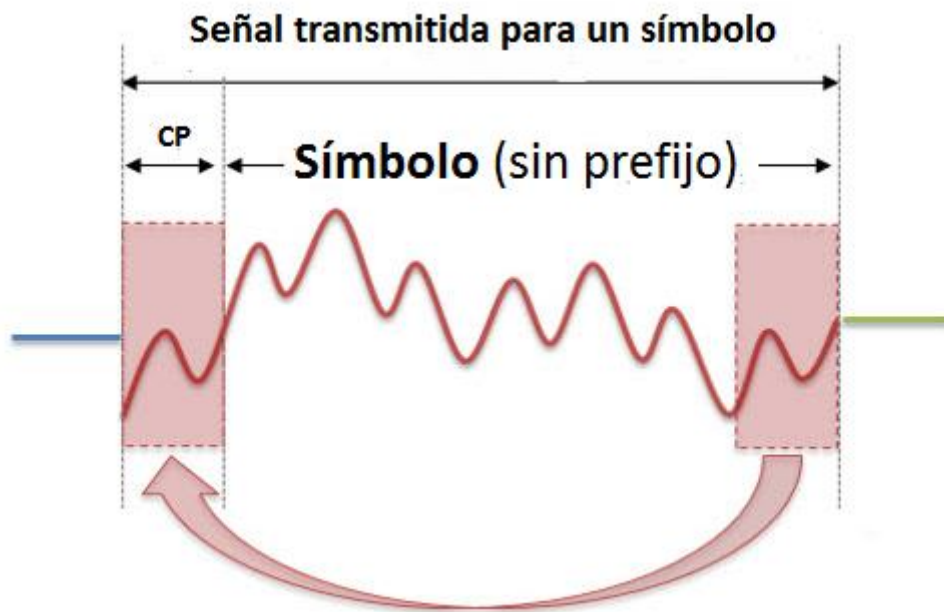


Ilustración 9: Prefijo cíclico

Uno de los objetivos de OFDM es simplificar la implementación tanto del transmisor como del receptor. Esto se consigue mediante la utilización de la **Transformada de Fourier Discreta** (DFT) y su **Inversa** (IDFT). Una forma muy eficiente de calcular la DFT y la IDFT, es hacer uso de la **Transformada Rápida de Fourier** (FFT).

Sabemos que la tasa de muestreo es $R_S = \frac{1}{T_S}$, $\Delta f = \frac{1}{T}$ y que $T = N T_S$. Por tanto, $T_S = \frac{T}{N}$ y $f_s = \frac{N}{T}$. Por tanto, $x(t)$ es equivalente a su versión muestreada:

$$x_l(n T_S) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c_{k,l} e^{j2\pi \Delta f k n T_S - l T} =$$

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c_{k,l} e^{j2\pi \frac{1}{T} k n T_S} =$$

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c_{k,l} e^{j2\pi \frac{1}{N} k n}$$

Dada una secuencia discreta $x(n)$ con $n=0,1,\dots,N-1$, su DFT y su IDFT se puede escribir tal que:

$$DFT\{x[n]\} = X[i] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{1}{N} i n} \quad i = 0, 1, \dots, N-1$$

$$IDFT\{X[i]\} = X[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} X[i] e^{j2\pi \frac{1}{N} i n} \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

Como se puede observar, la ecuación de $x_l(n T_S)$ se corresponde con la IDFT de la secuencia en frecuencia c_k . De manera similar, aplicando la DFT en la recepción se demodula fácilmente la señal recibida $r(t)$. Dado que se quiere utilizar la FFT y la IFFT, será necesario escoger N de tal manera que sea una potencia de 2, ya que así es posible simplificar la DFT y la IDFT.

El diagrama del sistema OFDM en tiempo discreto implementado mediante el uso de la FFT y la IFFT es el de la figura:

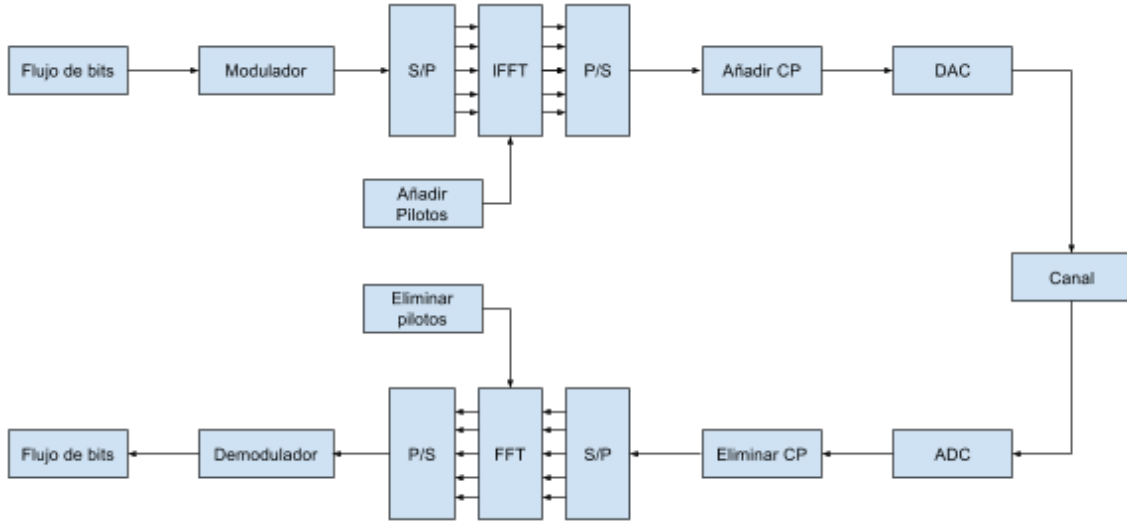


Ilustración 10: Diagrama de bloques OFDM

Como se ha mencionado, las principales ventajas de OFDM son la eliminación de los efectos de la ISI y la ICI, y la mejora en la eficiencia del uso del espectro. Además de esto, OFDM es más robusto frente a desvanecimientos selectivos en frecuencia.

Sin embargo, OFDM también presenta algunos inconvenientes. Los principales errores de OFDM tienen que ver con la sincronización y la **Peak to Average Power Ratio**(PAPR).

Si una señal está formada por la suma de N señales de amplitud máxima 1 Voltio, es posible que en un momento dado dicha señal tenga una amplitud máxima de N voltios, en caso de que las N señales se encuentren sumando en su amplitud máxima.

La PAPR se define como:

$$PAPR = \frac{\max |x(t)|^2}{P_{avg}}$$

Donde P_{avg} es la potencia media.

En el caso de OFDM, cuantas más subportadoras haya, más grande será la PAPR. Una PAPR grande dificulta la implementación del **convertor digital-analógico** (DAC) y del **convertor analógico-digital** (ADC). Además, también aumenta la tasa de error cuando una señal OFDM pasa a través de un amplificador no lineal e incrementa el ruido presente en la banda de interés. Para mitigar la PAPR existen diversas opciones.

Por una parte, es posible mantener el nivel de potencia de la señal a un determinado nivel pero esto genera ICI. Por otra parte, se puede aplicar mapeo selectivo. Esto consiste en multiplicar la señal por una serie de códigos, calcular la IFFT de cada uno y escoger aquel que genere una PAPR menor. Por último, se puede aplicar la IFFT parcial. La IFFT parcial consiste en dividir la señal en celdas, calcular la IFFT de cada una y combinarlas. Para entenderlo mejor se va a utilizar un ejemplo.

Se supone que se tiene una señal OFDM de 128 subportadoras, donde cada una tiene una potencia normalizada de 1 W. En este caso la PAPR es de 21 dB. Si se quiere aplicar la IFFT parcial, primero habrá que dividir las 128 subportadoras en grupos. En este caso, se hacen 4 grupos de 32 subportadoras cada una, de forma que la máxima PAPR de cada grupo es de 12 dB. Posteriormente, estos cuatro grupos se combinan dando lugar a la señal original. Por tanto, esta PAPR es menor que la PAPR obtenida sin aplicar la IFFT parcial.

El principal problema de OFDM es su alta sensibilidad a los problemas de sincronización, en particular al offset frecuencial. Los errores de sincronización se pueden dar en tres niveles.

Primero, se encuentra los problemas de sincronización de símbolo o de temporización. En este caso, el transmisor y el receptor no tienen una referencia de tiempo común. Por ello, el receptor debe encontrar los límites del símbolo para evitar la aparición de ISI o ICI. Un offset de temporización provoca una rotación de las subportadoras dentro de la constelación utilizada. Este efecto es más intenso cuanto más nos acercamos a los extremos de la banda de frecuencia. Por ejemplo, para una constelación QPSK, el efecto de canal y el error de sincronía de símbolo es tal que:

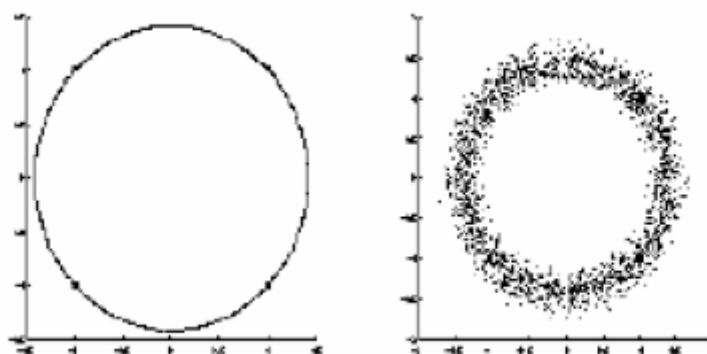


Ilustración 11: Error de sincronización de símbolo

Si el error de sincronización es lo suficientemente pequeño como para que la respuesta al impulso del canal se mantenga dentro del CP, la ortogonalidad se mantiene. En este caso, el offset es considerado como un desplazamiento de fase introducido por el canal, y por ello, las rotaciones de fase introducidas pueden estimarse mediante un estimador de canal. Sin embargo, en el caso de que el error no se mantiene dentro del CP, aparecerá ISI.

Para poder minimizar el efecto de este error de sincronización existen dos opciones: una alternativa basada en la utilización de pilotos y otra basada en el CP.

En el primer caso, se hace uso de una serie de subportadoras con símbolos de fases y amplitudes conocidas. Este método tiene tres pasos. En el primer paso se detecta si hay presencia o no de señal OFDM midiendo el nivel de potencia y comparándolo con un determinado umbral. En el segundo paso llamado sincronización gruesa, se adquiere un alineamiento de sincronización con un error máximo de 0.5 muestras. Esto se llevaba a cabo para simplificar el proceso posterior de captura. Esta sincronización gruesa se consigue realizando una correlación de la señal recibida con una copia retrasada de la misma. Para poder detectar el pico de correlación con la precisión adecuada, se hace uso de un filtro digital que interpola los datos a una velocidad cuatro veces superior a la original. En el último paso, se ecualizan las subportadoras mediante la estimación de canal obtenida a partir de los pilotos.

En el caso de la alternativa basada en el CP, se toma la diferencia entre una muestra perteneciente al CP y otra perteneciente al símbolo OFDM al que pertenece dicho CP. Por tanto, dicha diferencia será pequeña, y haciendo uso de una ventana rectangular de la misma longitud que el CP, se obtienen una serie de mínimos. Estos mínimos se encontrarán al principio del símbolo OFDM y por tanto ayuda a mitigar el efecto del error de sincronización de símbolo.

Segundo, se encuentran los errores de sincronización de la frecuencia de muestreo. En este caso, la señal recibida ha de ser muestreada en los instantes de tiempo dados por el reloj de la recepción. La presencia de un offset en la frecuencia de muestreo introduce ICI y además, la

componente útil de la señal se ve atenuada y rotada. Para poder luchar contra este tipo de errores, existen dos métodos.

Por una parte, es posible aplicar un algoritmo de temporización que controla un oscilador de cristal controlado por tensión con la intención de alinear los relojes de transmisión y recepción. Esto se puede aplicar en sistemas de muestreo sincronizado. Por otra parte, en los sistemas de muestreo no sincronizados la tasa de muestreo permanece fija y se realiza un post-procesado digital.

Finalmente, se encuentran los errores de sincronización de frecuencia de subportadora. La diferencia entre las frecuencias de las subportadoras en el transmisor y receptor introduce ICI en el sistema. Al haber un offset frecuencial, las frecuencias de las subportadoras se ven desplazadas, y por tanto se pierde la ortogonalidad. Por ello, el receptor tiene que compensar el offset frecuencial además del offset de fase para poder llevar a cabo una correcta detección. Para ello, existen dos métodos para solucionar este error: método basado en el CP y método basado en pilotos.

En el primer caso, se hace uso de la redundancia introducida por el CP de dos formas: creando una función que alcanza su máximo en el instante de offset nulo y hallando dicho máximo, o bien haciendo uso de la estimación de máxima verosimilitud.

En el segundo caso, se utilizan ciertas subportadoras para transmitir símbolos conocidos. Esto permite la estimación de la rotación de fase que tiene una correspondencia directa con el offset frecuencial.

Para poder llevar a cabo la demodulación de los datos, es necesario realizar primero la estimación de canal. Las técnicas de estimación de canal son diversas, pero las más utilizadas en OFDM son las que se basan en el uso de pilotos. En función de la forma de insertar los pilotos, se aplica una técnica u otra.

Una de las técnicas de inserción de pilotos más utilizadas consiste en reservar ciertas subportadoras para transmitir símbolos conocidos. Por tanto, se reservan ciertas frecuencias de forma fija para transmitir los pilotos a lo largo del tiempo.

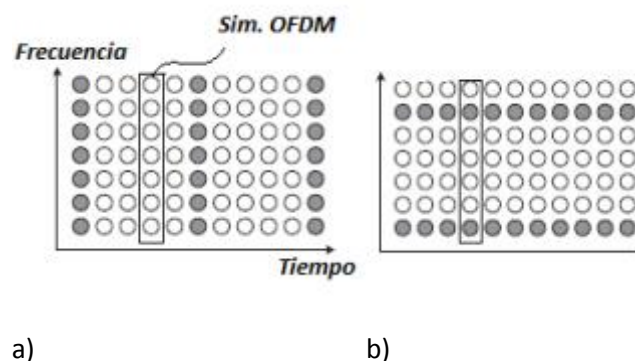


Ilustración 12: Estructura de símbolos de piloto. a) Block Type, b) Comb Type

En este tipo de técnicas se hace uso de la interpolación para, a partir de los pilotos recibidos, hacer una estimación del canal. Esta interpolación puede ser de distintos tipos pero normalmente suele ser lineal.

Una vez hecha la estimación de canal, se procede a realizar la ecualización.

En este caso, se supone que se ha eliminado el CP y todos los errores de sincronización. Por tanto, la señal demodulada en tiempo discreto en dicho momento y tras aplicarle la DFT Y , tiene la siguiente forma:

$$Y = HX + W$$

Donde X representa todos los símbolos modulados antes de realizar la IDFT, donde W es la DFT del AWGN y donde H es la DFT de la respuesta al impulso del canal. Existen diversos tipos de ecualización pero uno de los tipos más utilizados es la ecualización mediante el criterio del **Zero Forcing (ZF)**. Esta ecualización aplica la inversa de la respuesta al impulso del canal en frecuencia a la señal recibida para conseguir los datos transmitidos.

Tras haber hecho la estimación de canal se obtiene una matriz H_{est} que es la estimación del canal. Suponiendo que $H_{inv\ est}$ sea la inversa de H_{est} , se tiene que:

$$H_{inv\ est} Y = X + H_{inv\ est} W$$

Eliminando el efecto del ruido, y dado que se tiene tanto $H_{inv\ est}$ como Y , es fácil obtener X . Tras obtener los símbolos demodulados, el siguiente paso es realizar la detección.

2.3. Masked OFDM

Masked-OFDM se basa en la estructura de OFDM pero a ésta se le aplica una máscara que reduce la amplitud de las subportadoras más externas para reducir las interferencias producidas por las emisiones fuera de banda u **Out-of-Band Emissions (OBE)**.

El sistema sigue prácticamente los mismos pasos que OFDM. La única diferencia es que se aplica la máscara antes de aplicar la IFFT. Por tanto, si $b[n]$ es la máscara aplicada y $x[n]$ es el conjunto de símbolos antes de pasar por la IFFT se tiene que:

$$v[n] = x[n] b[n]$$

Donde $v[n]$ es el conjunto de símbolos tras aplicarle la máscara. A este $v[n]$ se le aplica la IFFT y se sigue el mismo proceso que en OFDM.

2.4. NB-IoT

NB-IoT se basa en el principio de usar una banda estrecha para el **Internet of Things (IoT)** o Internet de las cosas. Se suele desplegar dentro del espectro asignado a LTE, utilizando bloques de recursos de una portadora LTE normal, o bien mediante bloques de recursos no

utilizados dentro de las bandas de guarda de LTE. En la gráfica siguiente se presentan las dos formas de insertar esta NB tal y como se ha explicado.

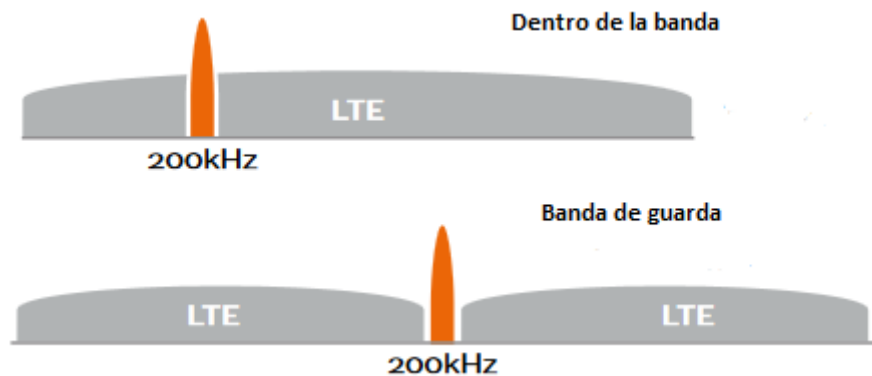


Ilustración 13: NB-IoT

2.5. SC-FDMA

Como se ha explicado en el apartado anterior, uno de los mayores problemas de OFDMA es la alta PAPR que genera un incremento del consumo de energía. Una de las alternativas ofrecidas se basaba en agrupar las portadoras en conjuntos más pequeños para reducir la PAPR. Basándose en este principio, surge la modulación **Single Carrier Frequency Divison Multiple Access** (SC-FDMA) que se utiliza en el enlace de subida de LTE. En SC-FDMA, todos los datos transmitidos en un mismo intervalo de tiempo se modulan como una combinación lineal de estos símbolos de datos. En consecuencia, un símbolo en una subportadora contiene componentes relacionados con la información mapeadas en otras subportadoras. De esta manera, se reduce el PAPR y, en consecuencia, se minimiza la interferencia y el consumo de batería del User Equipment.

Aunque SC-FDMA es una técnica basada en portadora única, puede ser percibida como una versión precodificada de OFDMA mediante el uso de la DFT. Los símbolos en el dominio del tiempo modulados con un esquema M-PSK o M-QAM atraviesan un bloque DFT en el transmisor pasando los símbolos al dominio de la frecuencia. Posteriormente, en el receptor, esta operación deberá revertirse haciendo uso de la IDFT.

Para entenderlo mejor se van a comparar los diagramas de bloques de OFDMA y SC-FDMA implementados mediante DFT e IDFT.

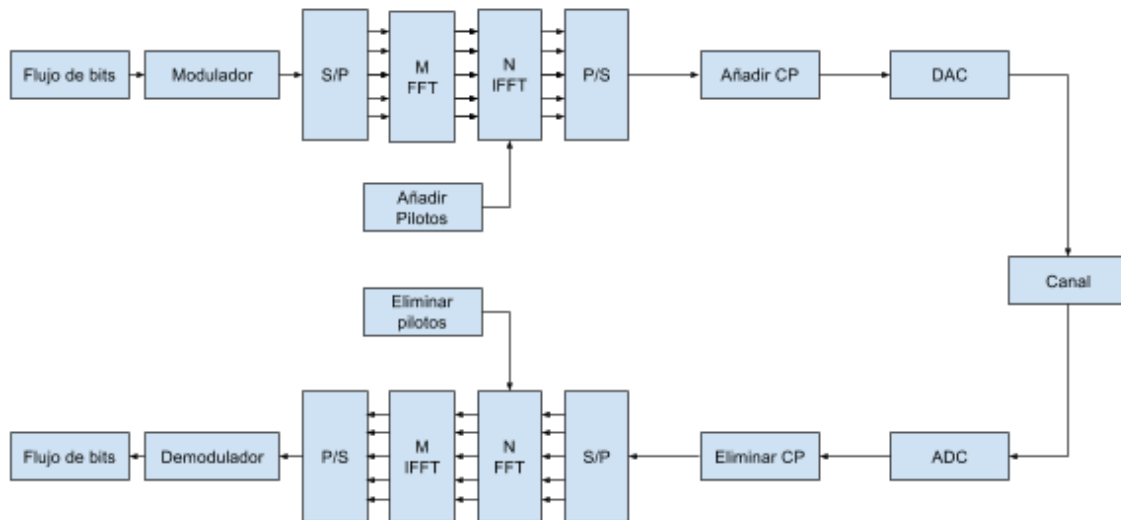


Ilustración 14: Diagrama de bloques SC-FDMA

Como se puede observar, la diferencia se encuentra en los bloques DFT e IDFT de tamaño M en la transmisión y la recepción respectivamente.

A la hora de asignar las subportadoras existen diferentes técnicas: modo distribuido y modo localizado.

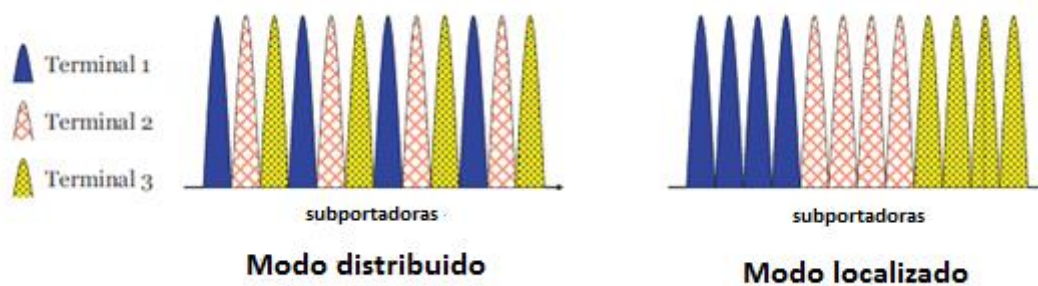


Ilustración 15: Modos SC-FDMA

En el modo localizado, cada terminal usa un conjunto de subportadoras adyacentes para transmitir sus símbolos, mientras que en el modo distribuido, las subportadoras de un solo terminal se distribuyen a lo largo de la banda de frecuencia.

2.6. UPMC

OFDM es una modulación que se utiliza para en enlace de bajada de LTE, pero LTE no está considerada como una tecnología perteneciente al 4G debido en parte a las carencias de dicha

modulación. Por tanto, se da la necesidad de encontrar nuevas técnicas de modulación que puedan ser usadas tanto en 4G como en 5G. **Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC)** surge como un método de modulación multiportadora que busca satisfacer los requerimientos de la quinta generación de sistemas móviles o 5G.

UFMC propone agrupar subportadoras dando lugar a sub-bandas, realizar la IFFT de cada sub-banda, aplicarle un filtro de un tamaño adecuado en función del tamaño de la sub-banda, y finalmente, sumar todas las sub-bandas dando lugar a la señal a transmitir.

El filtrado alarga la duración del símbolo en el tiempo debido a la operación de convolución, de forma que la duración total del símbolo pasa de N a $N + L - 1$ donde L es la duración del filtro y N la duración del símbolo tras aplicarle la IFFT. Esto provoca que símbolos adyacentes se solapen. Debido a esto, UFMC utiliza una banda de guarda nula en vez de CP pero esto a su vez introduce ICI en el sistema. Pero esta ICI introducida es controlada ya que se sabe que cuantas más sub-bandas se filtren dentro de la banda de frecuencias, menor será el efecto de la ICI.

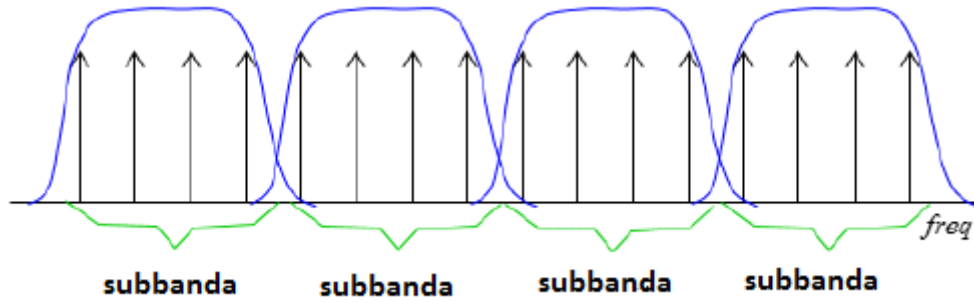


Ilustración 16: Subbandas UFMC

El filtro elegido para UFMC es un filtro Dolph-Chebyshev debido a su baja tasa de caída en los lóbulos laterales y su longitud máxima es la longitud del CP utilizado en OFDM.

Se supone que se tiene N subportadoras asignadas al k -ésimo usuario que se dividen en B sub-bandas. Además, se asume que cada sub-banda i está formada por M_i subportadoras. Por tanto:

$$\sum_{i=1}^B M_i = N$$

A cada sub-banda se le aplica una IFFT de tamaño N y posteriormente se le aplica un filtro de tamaño L . El vector de datos completo x_k del k -ésimo usuario será la suma de las B sub-bandas filtradas:

$$x_k = \sum_{i=0}^B (x_{i,k} * f_{i,k})$$

Donde $f_{i,k}$ es filtro de la banda i -ésima de tamaño L y $x_{i,k}$ es vector de datos de la i -ésima banda tras realizar la IFFT de tamaño N . Por tanto, el vector de datos x_k será de tamaño $N + L - 1$ debido a la convolución.

El receptor de UPMC guarda mucho parecido con el de OFDM. En este caso, después de que la señal pase por la ventana de preprocesado en el dominio del tiempo para eliminar las interferencias, se añaden ceros a la señal hasta llegar a un tamaño que sea la siguiente potencia de 2 de N . Después de lograr esto, se realiza la FFT de tamaño $2N$ para volver al dominio de la frecuencia. Tal y como se ha explicado anteriormente, el escoger una potencia de 2 de N no es casualidad, y esto se debe a que de esta manera es posible aplicar la FFT simplificando las operaciones notablemente.

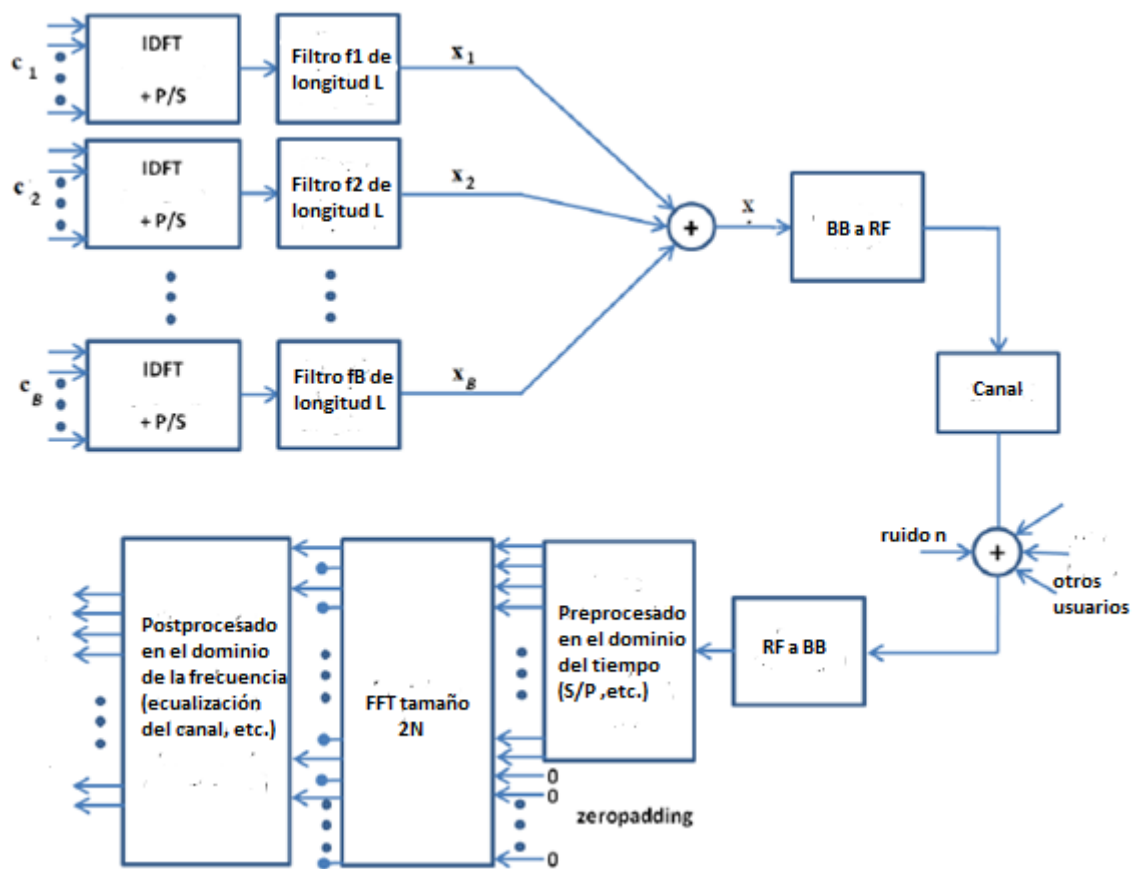


Ilustración 17: Diagrama de bloques UPMC

Una vez hecho esto, es necesario reducir el número de subportadoras nuevamente a N y para ello se escogen solo aquellas portadoras cuyas posiciones sean impares. Finalmente, se realiza el post-procesado consistente en la estimación del canal y la ecualización al igual que en los casos anteriormente descritos.

2.7. SC-UFMC

La idea, en este caso, es similar a lo que ocurriría con SC-FDMA. El esquema es el mismo que el utilizado en UFMC pero se incluyen unas FFT de tamaño M al recibir los símbolos modulados.

CAPÍTULO 3: OPENAIR INTERFACE

3.1. Introducción a Openair Interface

Tal y como se ha explicado anteriormente, Openair Interface se va a utilizar para enviar la banda ancha creada en Labview. Para poder llevarlo a cabo es necesario implementar la arquitectura típica de LTE basada en la E-UTRAN y la EPC en dos ordenadores distintos cuyo sistema operativo sea Linux.

3.2. Arquitectura LTE

La arquitectura de la red LTE deriva de las anteriores arquitecturas de GSM y UMTS, pero a diferencia de estas, LTE solo está diseñada para soportar conmutación de paquetes y no conmutación de circuitos. La red se compone de una red de acceso conocida como **E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network)** y una red de Core llamada **EPC (Evolved Packet Core)** o **CN (Core Network)**.

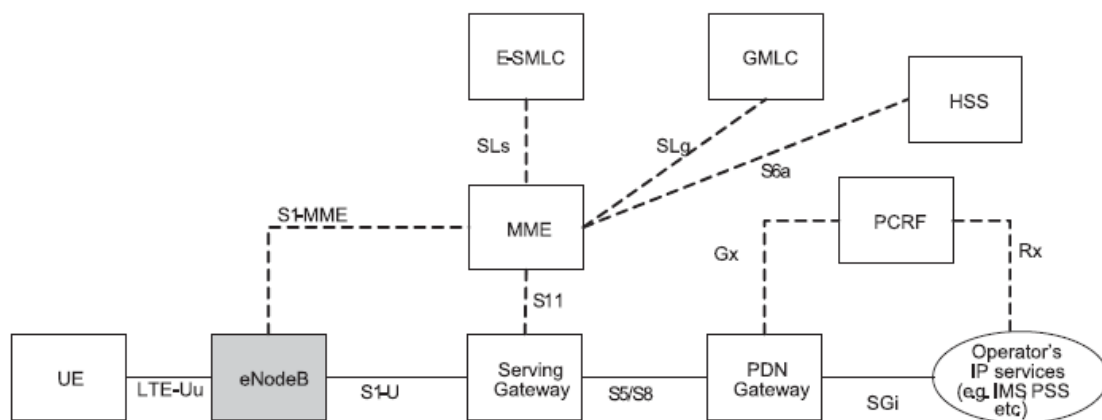


Ilustración 18: Arquitectura LTE

3.2.1. E-UTRAN

La E-UTRAN se compone de estaciones base LTE denominadas **eNodeBs (evolved NodeB)** interconectadas entre sí mediante unas interfaces llamadas X2 y con la EPC mediante la interfaz S1, más específicamente, con el MME mediante la interfaz S1-MME y al S-GW mediante la interfaz S1-U.

Estos eNodeBs son responsables de la gestión y asignación de recursos radio, control de la movilidad, posicionamiento, compresión de las cabeceras IP, asignación dinámica de recursos para los enlaces ascendente y enlace descendente, cifrado de la transmisión de datos en el canal radio y de la conectividad con la EPC. Además, cada eNodeB puede gestionar varias celdas.

A diferencia de las anteriores generaciones de redes móviles, LTE integra en los eNodeBs la función de gestión y asignación de recursos radio, lo que permite reducir la latencia y aumentar el rendimiento.

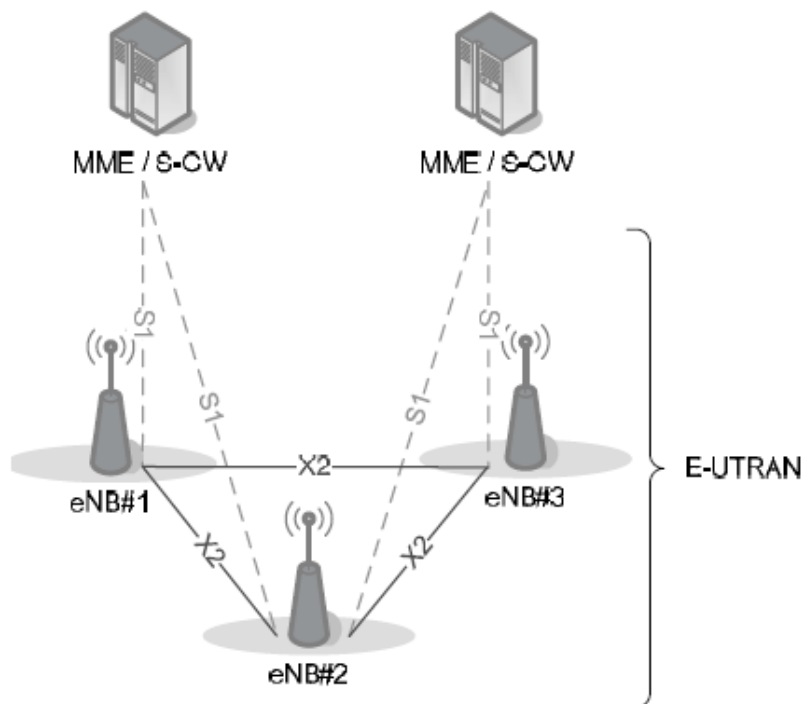


Ilustración 19: Arquitectura E-UTRAN

La interconexión entre los eNodeBs permite que el control sea distribuido, y por lo tanto se elimina la necesidad de disponer de un controlador dotado de una gran disponibilidad y capacidad de procesamiento, lo que reduce los costes y elimina el punto único de fallo (componente de un sistema que tras un fallo en su funcionamiento ocasiona un fallo global en el sistema completo, dejándolo inoperante). Pero este control distribuido obliga a la red a transferir toda la información de un determinado **User Equipment(UE)** de un eNodeB a otro cada vez que el UE se esté moviendo (handover). Durante esta transferencia de información se pueden dar pérdidas de datos, y para ello se utilizan las interfaces X2 que realizan un balanceo de carga y cancelan las interferencias.

LTE permite que varios nodos (del tipo MME o S-GW) de CN o Red Central puedan atender a un área geográfica común, conectándose mediante una red mallada al conjunto de eNodeBs de dicho área. Por tanto, un eNodeB puede ser atendido por varios MME/S-GW. Este concepto se denomina S1-flex, y es una de las características principales de la interfaz S1.

Este uso de un conjunto de nodos MME/S-GW para un área geográfica común permite que las UEs que se encuentran en celdas controladas por un determinado eNodeB se puedan compartir entre el dicho conjunto de nodos. Gracias a esto, es posible compartir la carga total y eliminar el punto único de fallo.

Si se despliegan femtoceldas, éstas también constituyen una parte de E-UTRAN. En este caso se puede añadir una pasarela HeNB (HeNB GW) entre HeNB y EPC para dar soporte a un gran número de HeNBs.

3.2.2. EPC:

El EPC o CN se encarga del control global del UE y del establecimiento de portadoras. Este EPC consta de varias entidades:

-S-GW (Serving GateWay): todos los paquetes IP de todos los usuarios en una red son transferidos a través del S-GW, que sirve de anclaje de movilidad local para el handover entre eNodeBs y entre tecnologías 3GPP (GPRS, UMTS, etc.). Cada UE se asigna a una única S-GW en tiempo. Además, almacena en un buffer los paquetes del enlace de bajada (downlink o DL) e información sobre las portadoras cuando el UE está inactivo. También se ocupa de la interceptación legal (lawful interception), la recaudación de información relevante al cobro, y el marcado y correspondencia de QoS en el nivel de transporte para DiffServ.

-MME (Mobility Management Entity): es el nodo de control que procesa la señalización entre el UE y la CN, sobre los que se aplican los protocolos Non-Access Stratum (NAS). Además, se encarga de la autenticación, la autorización, el control de seguridad en acceso (Access Stratum), el establecimiento de conexión entre el UE y la red, la itinerancia o roaming, y los procedimientos relacionados con la gestión de la ubicación del usuario. También se ocupa de la gestión de las portadoras, la selección de S-GWs o P-GWs, la gestión del área de tracking y paging, la gestión de movilidad en estado inactivo y la gestión de flujos EPS.

-P-GW (PDN-Gateway): se encarga de la asignación de direcciones IP a las UEs, y de las acciones relacionadas con la calidad del servicio y la gestión del flujo. Esto significa que filtra los paquetes de usuarios, aplica QoS para garantizar tasas requeridas de bits o de nivel de servicio tanto en el enlace descendente, como en el enlace ascendente. También sirve como anclaje de movilidad en el handover con tecnologías que no pertenecen al 3GPP, como por ejemplo WiMAX.

Además de estas tres entidades, existen más funciones lógicas que también forman parte de EPC en la arquitectura LTE:

-PCRF (Policy Control and Charging Rules Function): define las reglas para el cobro y el control de políticas. Es decir, define las acciones y reglas en caso de problemas de incompatibilidad entre la QoS que consta en el perfil del usuario y los servicios que se le ofrecen. Dichas funciones se aplican en el PCEF (Policy and Charging Enforcement Function).

-GMLC (Gateway Mobile Location Centre): contiene las funcionalidades requeridas para soportar Location Services (LCS) o Servicios de Localización. Después de producirse la autenticación, realizan peticiones de posicionamiento al MME, y recibe la localización final estimada.

-HSS (Home Subscriber Server): contiene la información del suscriptor como el QoS o perfil de itinerancia. También guarda la información sobre usuario local en la MME (es decir, la MME a la cual el UE está conectado) y las PDN a las que el UE se puede conectar mediante un Access Point Name (APN) (que según DNS es una etiqueta que describe el punto de acceso al PDN), o una dirección IP de PDN. También puede contener el Authentication Centre (AuC) o Centro de Autenticación, que genera las claves de seguridad y los vectores de autenticación.

-E-SMLC (Evolved Serving Mobile Location Centre): se encarga de la coordinación y programación de los recursos requeridos para hallar la posición del UE. También puede estimar la posición final de un UE en base a su velocidad y el nivel de precisión.

3.3. Instalación y configuración

Para implementar la arquitectura de LTE, es necesario seguir los comandos indicados por el soporte de Openair Interface, previa creación de una red que comunique los dos ordenadores unidos mediante un cable Ethernet. Para comprobar la funcionalidad de la red se realiza un ping que confirma su correcto despliegue. Además, se llevará a cabo la configuración del USRP B210 que será el encargado de transmitir la señal generada con este programa. A este USRP se le conecta dos antenas VERT 900.

Acto seguido, es necesario configurar el ordenador que funciona como eNodeB, indicando en su fichero de configuración la dirección IP del MME. Posteriormente, se procede con la configuración de la EPC. En este caso, es necesario editar los ficheros de configuración del MME, del HSS y del S-GW.

Finalmente, se graba la tarjeta SIM mediante un lector y configurarla con la misma información incluida en el HSS. De esta manera se podrá acceder a la red mediante el teléfono móvil.

3.4. Generación de la señal en banda ancha

Una vez realizada la instalación y la configuración de Openair, es posible generar una señal OFDM o m-OFDM y transmitirla. Para ello, es necesario lanzar primero el eNodeB desde la consola del ordenador que actúa como eNodeB. Después, se lanzan el HSS, el MME y el SGW en el ordenador que actúa como EPC. Una vez recibida la confirmación de que la conexión establecida es correcta, se puede seleccionar la señal a enviar así como sus parámetros más importantes (frecuencia de portadora, etc.). Posteriormente, haciendo uso del USRP se transmite la señal en banda ancha.

Finalmente, usando al SIM que se mencionó anteriormente, es posible conectarse mediante el teléfono móvil Xioami M3 a la red generada y navegar por Internet o realizar llamadas, tal y como se haría si la SIM perteneciese a una operadora real.

CAPÍTULO 4: CÓDIGO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

4.1. Mejoras OFDM, m-OFDM y NB-IoT

4.1.1. Simulación OFDM

En este caso, se parte de un código ya implementado con anterioridad. A dicho código se le realiza una modificación, permitiendo reducir el tamaño de la IFFT que se realiza en transmisión (y por tanto, el tamaño de FFT de recepción) así como a reducir el número de portadoras útiles que envían datos en la banda ancha. Así mismo, se ha añadido la posibilidad de utilizar una constelación 16-QAM y no únicamente una QPSK.

4.1.2. Implementación real OFDM, m-OFDM y NB-IoT

En este caso, la mejora realizada también afecta al tamaño de la IFFT/FFT de transmisión/recepción. En este caso, es posible reducir el tamaño de N hasta 256, pudiendo aumentar la frecuencia de muestreo y, en consecuencia, el ancho de banda de las subportadoras. Esto se ha llevado a cabo con la NB y no con la banda ancha.

La banda ancha se transmite mediante Openair Interface, tal y como se ha explicado anteriormente, generando una señal OFDM o una señal m-OFDM que sumada a la NB generada mediante Labview da lugar a un comportamiento parecido al explicado en el caso del NB-IoT.

El resultado se mide mediante un osciloscopio analizando la banda de frecuencias para observar el funcionamiento real del sistema implementado. Así mismo, para comprobar el funcionamiento de la red implementada mediante Openair Interface se conecta un dispositivo móvil de forma que puede navegar por Internet o realizar llamadas.

4.2. Sistema de comunicaciones basado en SC-FDMA

Una vez explicada la teoría de SC-FDMA, se procede con su implementación en Labview. Se van a explicar tanto el transmisor como el receptor, tratando los principales bloques que lo conforman.

4.2.1. Transmisor

El primer paso en la implementación del transmisor es la generación de los bits a transmitir. Estos bits serán aleatorios y su generación depende de una serie de parámetros. Dados el número de símbolos OFDM y el número de subportadoras se obtiene el número de símbolos a transmitir. Posteriormente, en función de la modulación usada (4-QAM o 16-QAM) y el número de símbolos se obtiene el número de bits a modular, a partir del cual se generan los bits de forma aleatoria. Estos datos se modulan mediante la constelación elegida y pasan al siguiente bloque. Se escogen 100 símbolos OFDM y en el caso de la banda ancha 600 subportadoras mientras que para la banda estrecha se escogen tan solo 24 subportadoras.

En el siguiente bloque se lleva a cabo la FFT de tamaño 24 subportadoras. Para ello, para cada símbolo OFDM se extraen 24 subportadoras del bloque de 600 portadoras en el caso de la banda ancha o el bloque completo de 24 subportadoras en el caso de la banda estrecha y se les aplica la FFT. En el caso de la banda ancha, en función del bloque que sea se insertará en una posición u otra de la banda de 600 subportadoras.

Una vez hecho esto, se insertan los pilotos de forma que en recepción se pueda estimar el canal fácilmente. Tres de estos pilotos se insertan en cada bloque. Uno de los pilotos se sitúa en el centro del grupo y los otros dos se encuentran más cerca de los extremos. También se colocan tres pilotos al principio de la banda ancha y otros tres al final. Tras ello, se genera el 'hueco' en el centro de la señal, esto es, una serie de portadoras en las que no se transmite nada utilizadas para anular el efecto del offset en la frecuencia de la portadora.

Acto seguido se realiza el Zero-Padding, que consiste en rellenar de ceros las portadoras en las que no se envíe información. Se introducen $1024 - 24$ ceros y posteriormente se realiza la IFFT de tamaño 1024. En el caso de la banda ancha, todo el proceso se repite para los distintos grupos de 24 subportadoras y se realiza una suma de todas las operaciones.

Se añade el CP tanto para la banda ancha como para la banda estrecha de un tamaño de 72 subportadoras, y se desplaza la banda estrecha en frecuencia de forma que sus subportadoras estén situadas a partir de la última subportadora de la banda ancha. Además, mediante un parámetro es posible controlar el número de subportadoras que hay de distancia entre ambas bandas. Finalmente, ambas señales (banda ancha y banda estrecha) se suman, pasan por un filtro conformador y dan lugar a una nueva que señal que pasa al siguiente bloque.

A esta nueva señal se le antepone una secuencia de entrenamiento o preámbulo. Esto se hace para permitir la detección del símbolo OFDM en recepción ya que sino no se sabría si se reciben datos o no. Estos preámbulos tienen una serie de parámetros que los definen, tales como su longitud, su potencia o el número de preámbulos que se introducen antes de cada señal de datos.

Finalmente, esta señal se codifica de manera que pueda ser enviada por los USRPs. Para ello, se definen una serie de parámetros tales como la frecuencia de muestreo o la frecuencia de las portadoras que están limitadas por la capacidad de la antena usada entre otras. También es necesario elegir la IP del USRP utilizado para transmitir, ya que todo el sistema funciona mediante una red interna y es necesario que las IP de los distintos USRPs pertenezcan a dicha red. Así mismo, será necesario elegir si el USRP transmisor actúa como interferencia o como señal útil.

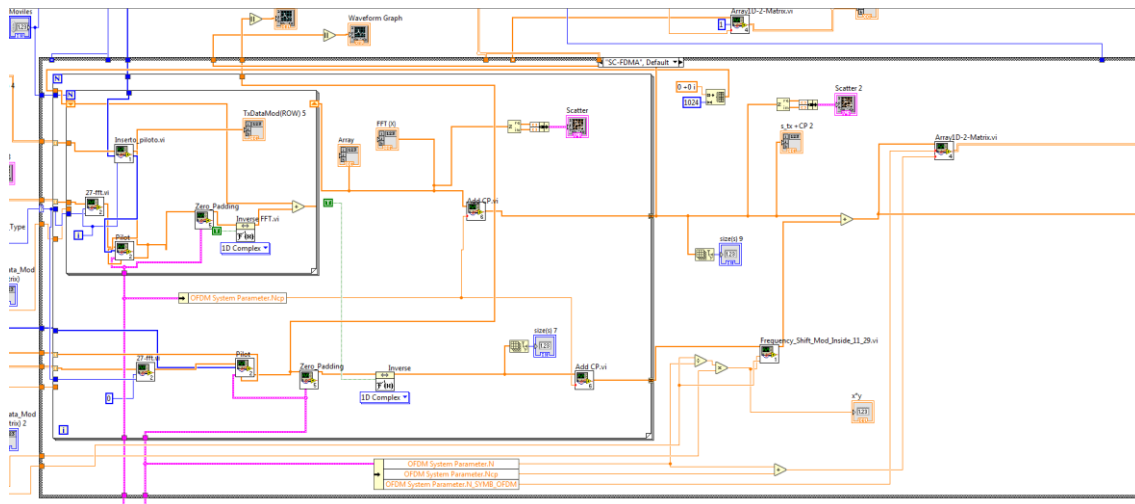


Ilustración 20: Transmisor SC-FDMA

En este caso se puede observar los bloques principales del transmisor que son los bloques de más interés simulando la transmisión simultánea de una banda ancha y una banda estrecha modulados mediante SC-FDMA. Por una parte, en el fichero llamado '24-fft' se lleva a cabo la extracción de 24 subportadoras que conforman el bloque de símbolos a transmitir. Mediante los ficheros 'Inserto_piloto' y 'Pilot' se insertan los pilotos en las posiciones adecuadas en función del bloque que se tiene. Posteriormente, en el fichero 'Zero Padding' se realiza el Zero Padding tal y como se ha explicado anteriormente. Acto seguido se realiza la IFFT y se añade a la señal original que está vacía. Este proceso se hace el número de veces indicado por la variable 'Móviles' que por defecto está fijada a 22. De esta manera, se van sumando las señales de los distintos bloques y se les añade el CP.

En cuanto a la banda estrecha el proceso es similar solo que no se necesita el 'for' utilizado para la banda ancha ni el fichero 'Inserto_piloto' al tener tan solo un bloque de 24 subportadoras en este caso. Una vez añadido el CP, se realiza un desplazamiento en frecuencia de la banda estrecha de forma que la banda estrecha quede muy pegada a la banda ancha pero a unas frecuencias ligeramente superiores.

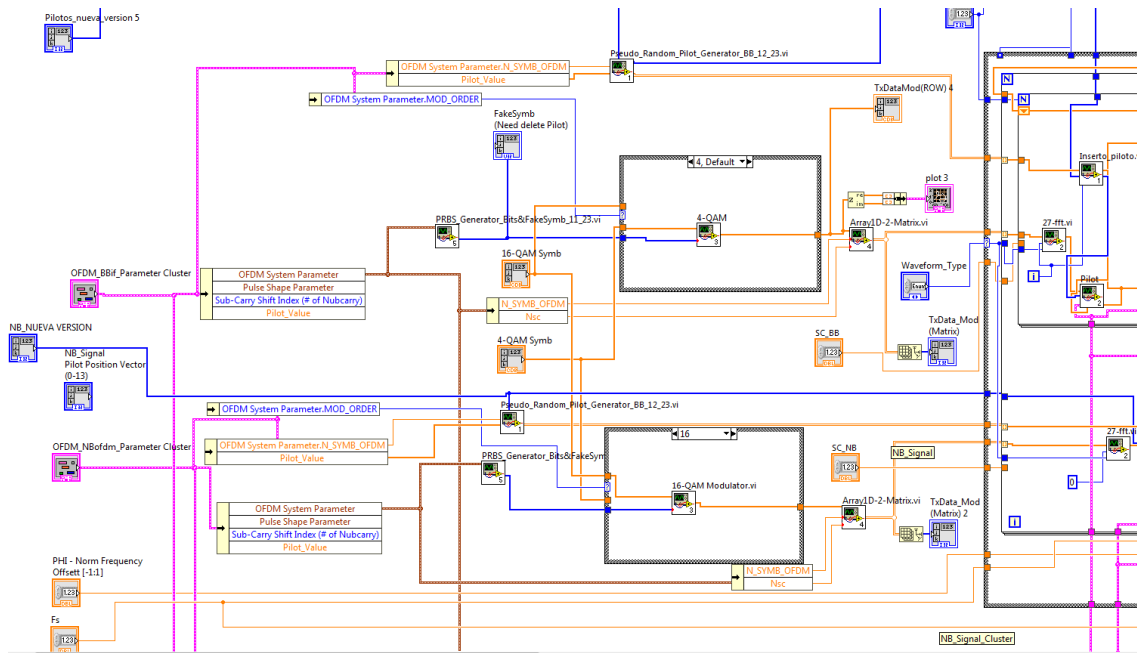


Ilustración 21: Constelación SC-FDMA

Como se puede observar, a partir de una serie de parámetros se generan los bits y se modulan bien mediante una modulación 4-QAM o bien mediante una 16-QAM en función de la variable 'MOD_ORDER'. Estos símbolos son los que van al siguiente bloque que se ha explicado antes. Los pilotos se generan a partir de un vector de posiciones preestablecido y con unos valores por defecto elegidos de forma pseudoaleatoria.

La variable F_s es la frecuencia de muestreo y la variable PHI controla el desplazamiento de la banda estrecha. Así mismo, la variable Sub-Carry Shift Index desplaza la banda ancha en la frecuencia. Las variables utilizadas pueden entenderse mejor observando el siguiente gráfico:

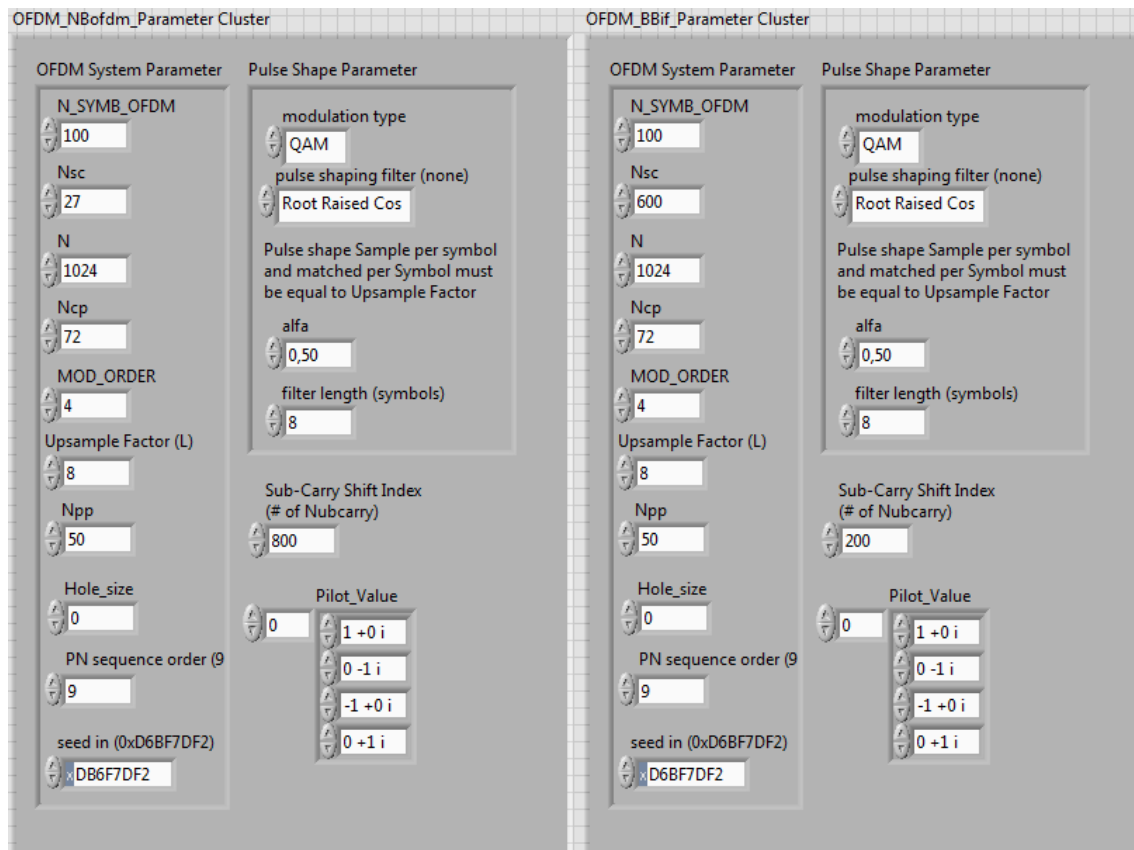


Ilustración 22: Parámetros de control SC-FDMA

Donde N_{SYMB_OFDM} es el número de símbolos OFDM enviados, N_{sc} es el número de subportadoras útiles, N es el tamaño de la IFFT y N_{cp} es el tamaño del CP. Existen otras variables, pero estas son las principales.

Finalmente, una vez se han sumado las dos señales se hace uso de un filtro conformador y la señal pasa al siguiente paso.

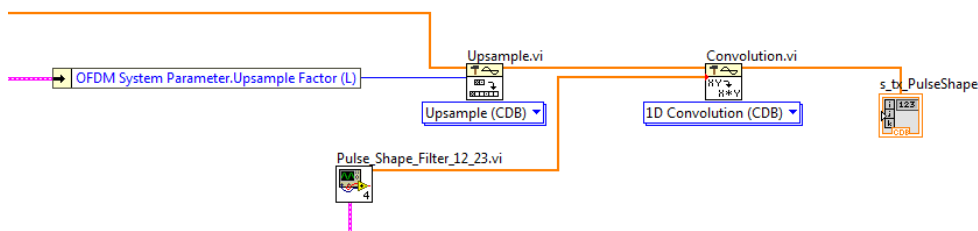


Ilustración 23: Filtro conformador SC-FDMA

En el siguiente bloque se añade la secuencia de entrenamiento o preámbulos, eligiendo la longitud de los preámbulos y el número de veces que aparecen, además de añadir una muestra de retraso para minimizar los errores introducidos por el USRP.

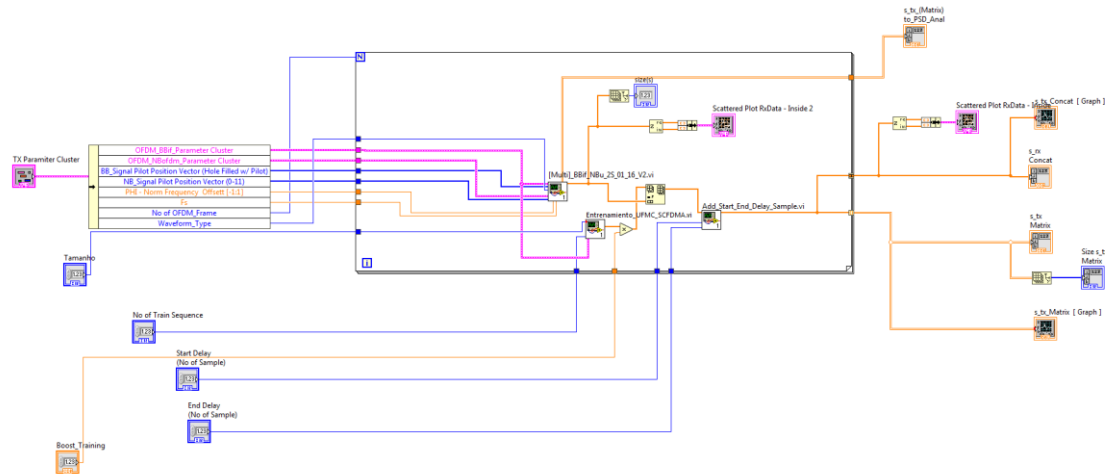


Ilustración 24: Adición secuencia entrenamiento

La señal pasa al último bloque donde se añade una señal Dummy también utilizada para facilitar la recepción que se implementará en el futuro. Desde aquí, mediante Boost Training es posible controlar la potencia de la señal de entrenamiento. Además, aquí se desarrolla todo el tratamiento necesario para poder enviar la señal mediante el USRP.

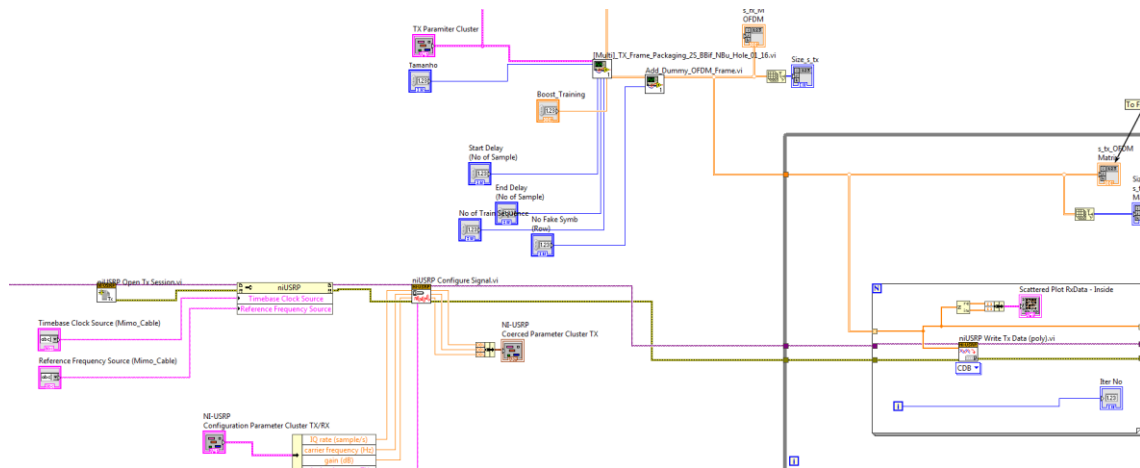


Ilustración 25: Señal transmitida SC-FDMA

4.2.2. Receptor

En cuanto al receptor se ha realizado su implementación pero para la simulación. Es decir, no se ha desarrollado el receptor para poder ser usado en una implementación real, y por tanto, no se han implementado los bloques de sincronización, de estimación del offset de la portadora, o los bloques de detección del comienzo de la señal. El receptor implementado toma la señal una vez se han resuelto todos los problemas de sincronización y se realiza el proceso inverso al explicado en el transmisor.

un CP después de este paso y la longitud de la señal es de $N + L - 1$ debida la convolución. El resto del proceso es igual que en el caso de SC-FDMA.

En cambio, el receptor sí que presenta algunas diferencias más notables. Al igual que en SC-FDMA es necesario ajustar los parámetros de forma que coincidan con los parámetros de transmisión. Tras esto, a la señal recibida se le añaden $2048 - (N+L-1)$ ceros y se le aplica una FFT de tamaño $2N = 2048$. Acto seguido, se eligen solo aquellas portadoras de las posiciones impares ya que, como se ha explicado, a partir de estas es posible demodular la señal, obteniendo N subportadoras. A partir de este punto el proceso es igual que en el caso de SC-FDMA.

La modulación UPMC consiste en el mismo proceso que SC-UPMC con la excepción de que no se lleva a cabo las FFT/IFFT de tamaño M en transmisión/recepción.

Para poder entender mejor SC-UPMC, se va a analizar el código. Como puede observarse, el código es muy similar al que se tenía para SC-FDMA, solo que se añade un filtro que se convoluciona con la señal tras aplicarle la IFFT.

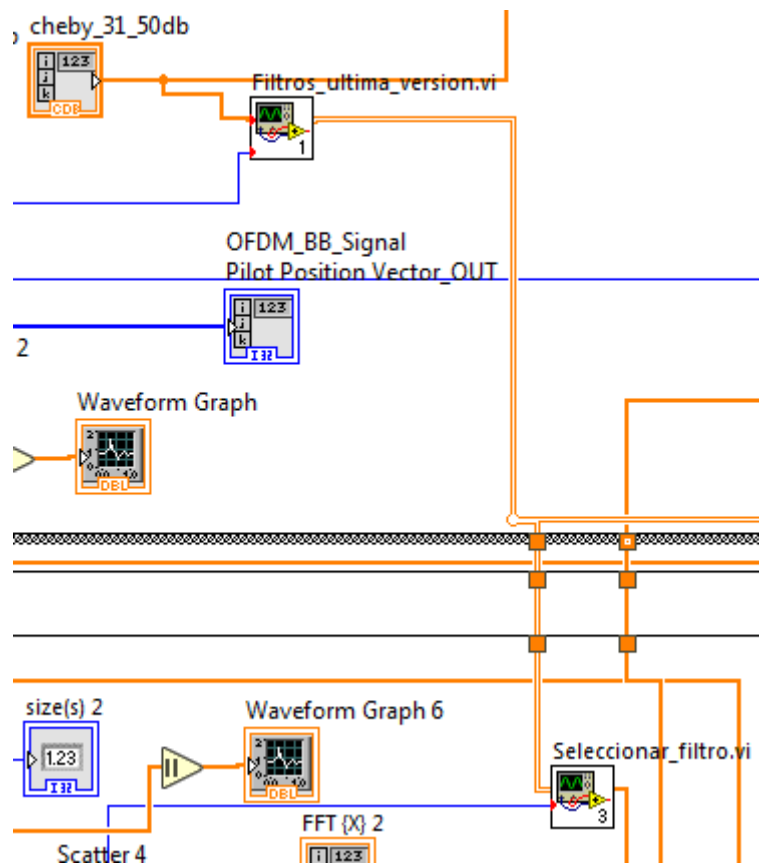


Ilustración 27: Generación filtros más selección

A partir de los coeficientes del filtro de Chebyshev generado mediante Matlab, se hace uso de 'Filtro_ultima_version' para generar los filtros de cada usuario. En función del número de

bloques que se tiene se generan más o menos filtros produciéndose el correspondiente desplazamiento en frecuencia para que posteriormente puedan sumarse las señales correctamente. Mediante 'Seleccionar_filtro' se selecciona el filtro correspondiente al bloque.

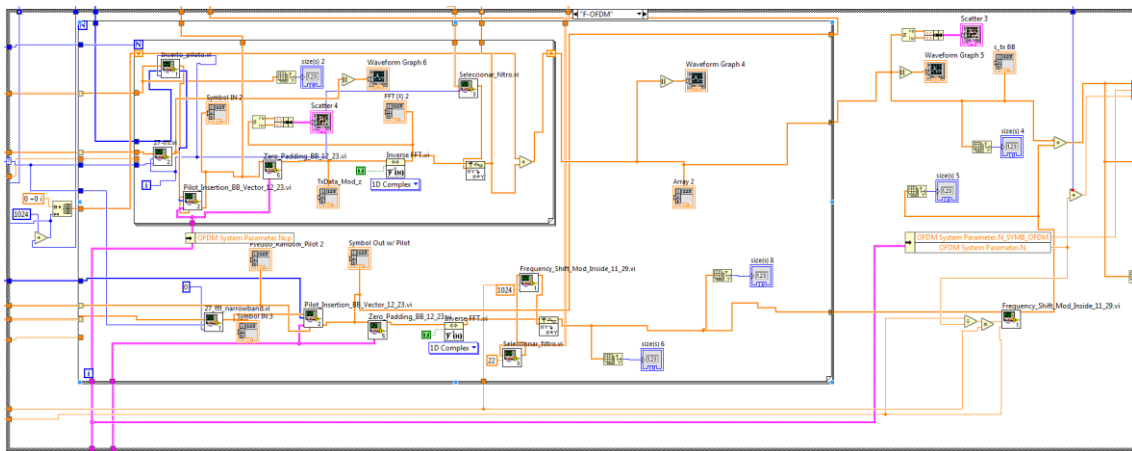


Ilustración 28: Transmisor SC-UFMC

Como se puede observar, para la banda estrecha el filtro se desplaza además en función de la variable PHI mencionada anteriormente. Además, las señales no presentan ningún CP.

En el caso del SC-UFMC, el receptor se implementa mediante código tal y como se muestra la gráfica. Mediante el fichero 'Alargar_fft' se añaden los ceros necesarios a la señal recibida para poder aplicar posteriormente la FFT de 2048 posiciones. Posteriormente, mediante 'Impar_fft' se extraen las posiciones impares y se lleva a cabo un proceso similar al de SC-FDMA.

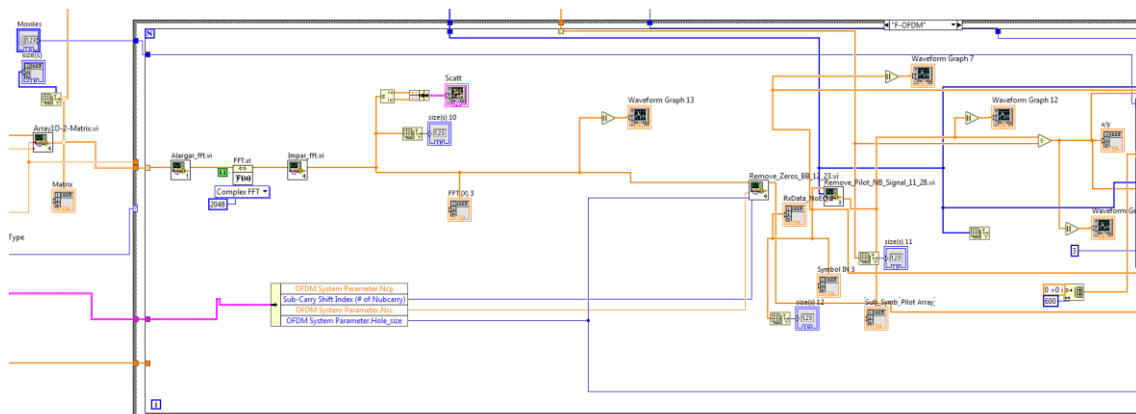


Ilustración 29: Receptor SC-UFMC 1

En el caso de SC-UFMC, la estimación de canal se realiza usando tan solo 3 pilotos a la hora de interpolar. Esto se debe a que debido a los filtros, el canal de cada usuario es distinto y por tanto se usan los pilotos asignados a cada bloque de 24 símbolos transmitidos.

Debido a que la única diferencia entre UFMC y SC-UFMC consiste en el uso de las FFT/IFFT de 24 portadoras, no se va a analizar el código de UFMC.

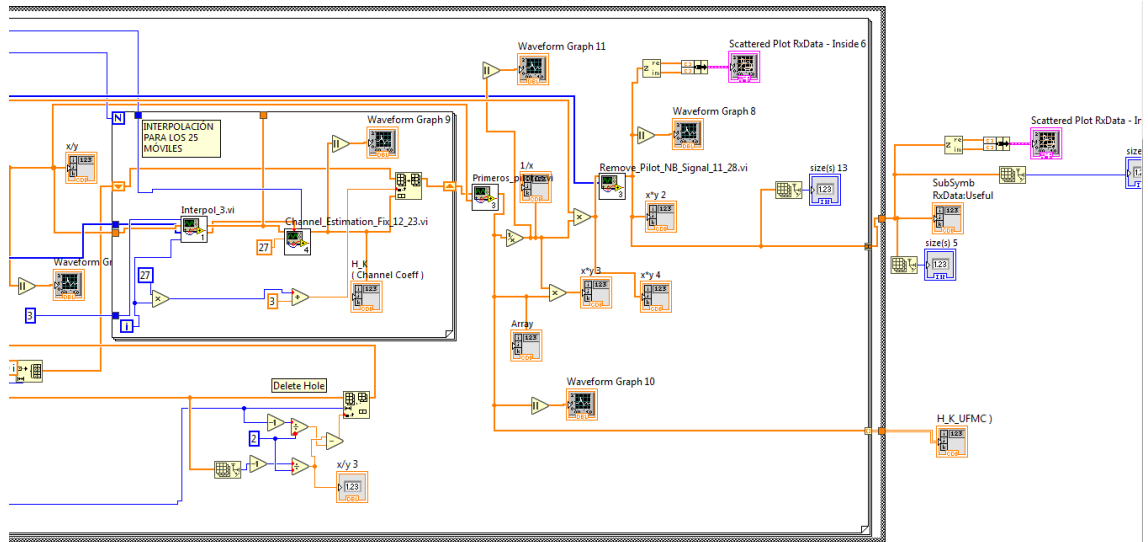


Ilustración 30: Receptor SC-UFMC 2

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. Mejora mediante OAI

En el primer caso se envía tan solo la banda estrecha generada mediante Labview y el USRP con una $N=256$. En este caso se recibe una señal con la siguiente forma:

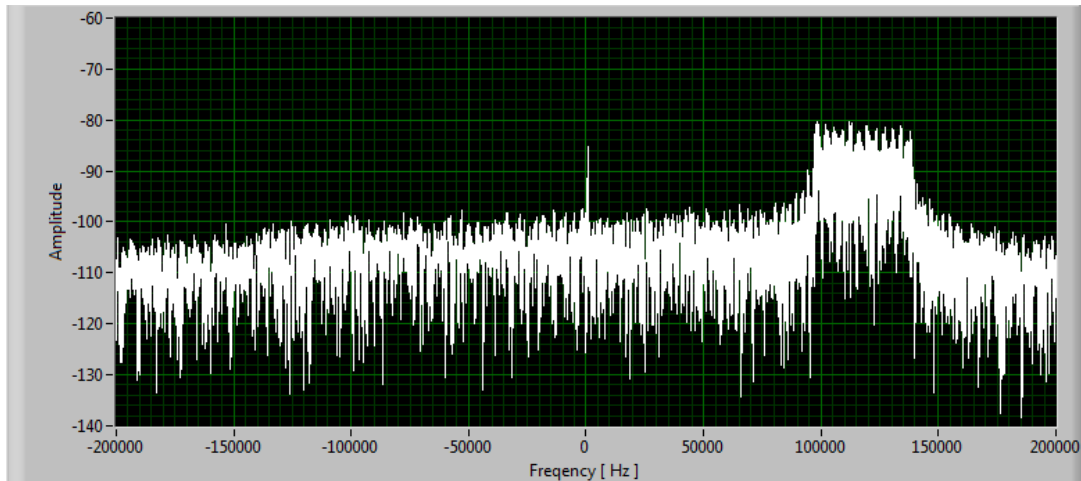


Ilustración 31: Señal banda estrecha OFDM

Como se puede observar, se tiene un armónico en el centro de la banda de frecuencias debido a la frecuencia de la portadora y la banda estrecha desplazada 624 subportadoras lo que se traduce en aproximadamente 950 kHz. En la gráfica se puede apreciar una potencia de aproximadamente -85 dBm que se ve incrementada debido a las características del hardware utilizado.

En cuanto a la constelación recibida en este caso, se puede apreciar una constelación QPSK casi perfecta:

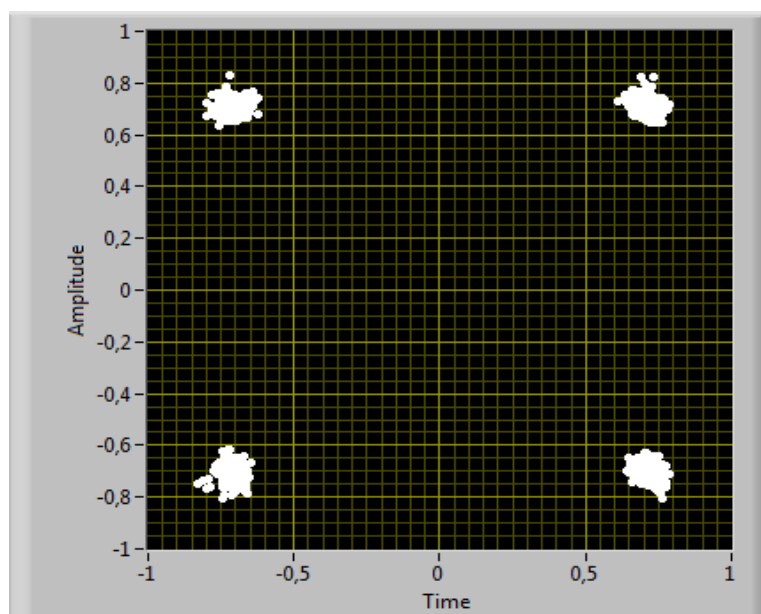


Ilustración 32: Constelación señal banda estrecha OFDM

A continuación, se añade la banda ancha OFDM generada con Openair Interface como interferencia dando lugar a una señal recibida del tipo:

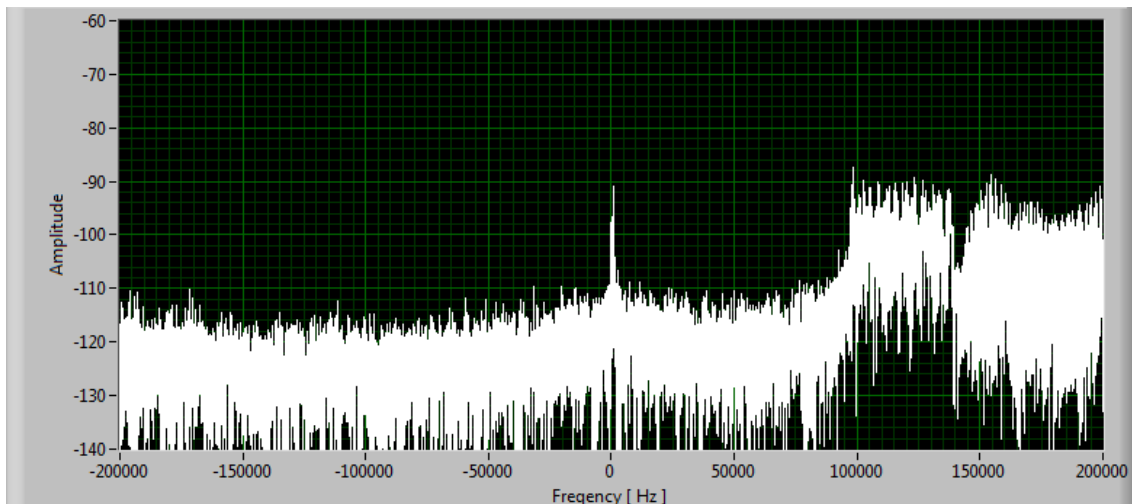


Ilustración 33: Señal NB + BB OFDM

Como se puede observar, la señal OFDM se añade prácticamente al lado de la señal NB dejando una separación mínima para minimizar las interferencias, y con unos niveles de potencia similares (-90 dBm) tal y como cabría esperar.

La constelación recibida en este caso tiene la siguiente forma:

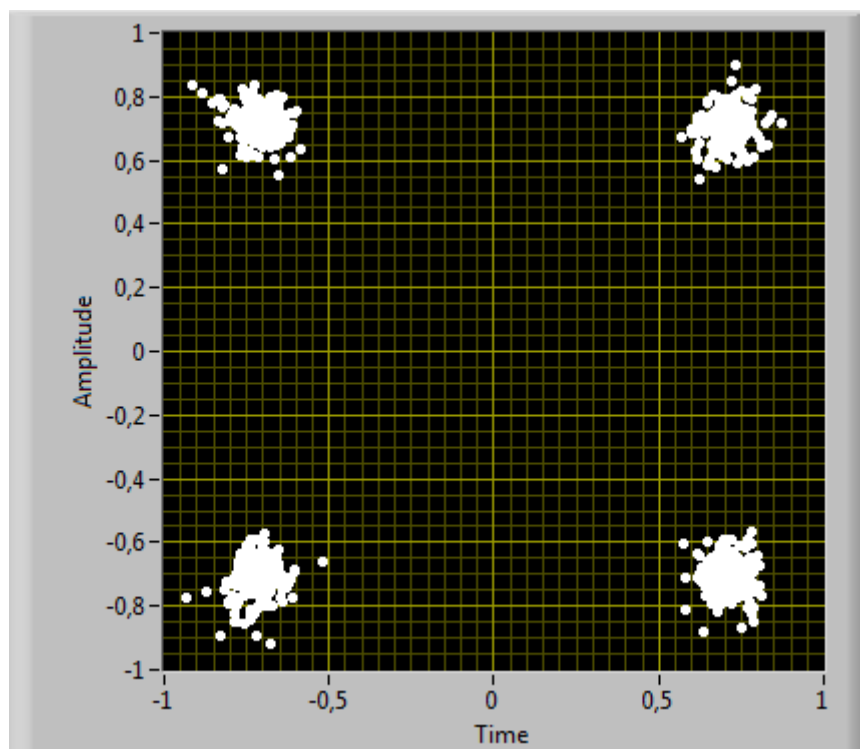


Ilustración 34: Constelación señal NB + BB OFDM

Como se puede observar, en este caso la constelación recibida tiene una peor forma que en el caso anterior. Los puntos se encuentran más separados entre sí lo que denota una peor demodulación. Esto se debe a la presencia de la señal OFDM que dificulta la operación del receptor de banda estrecha.

La señal medida mediante el osciloscopio en este caso tiene la siguiente forma:

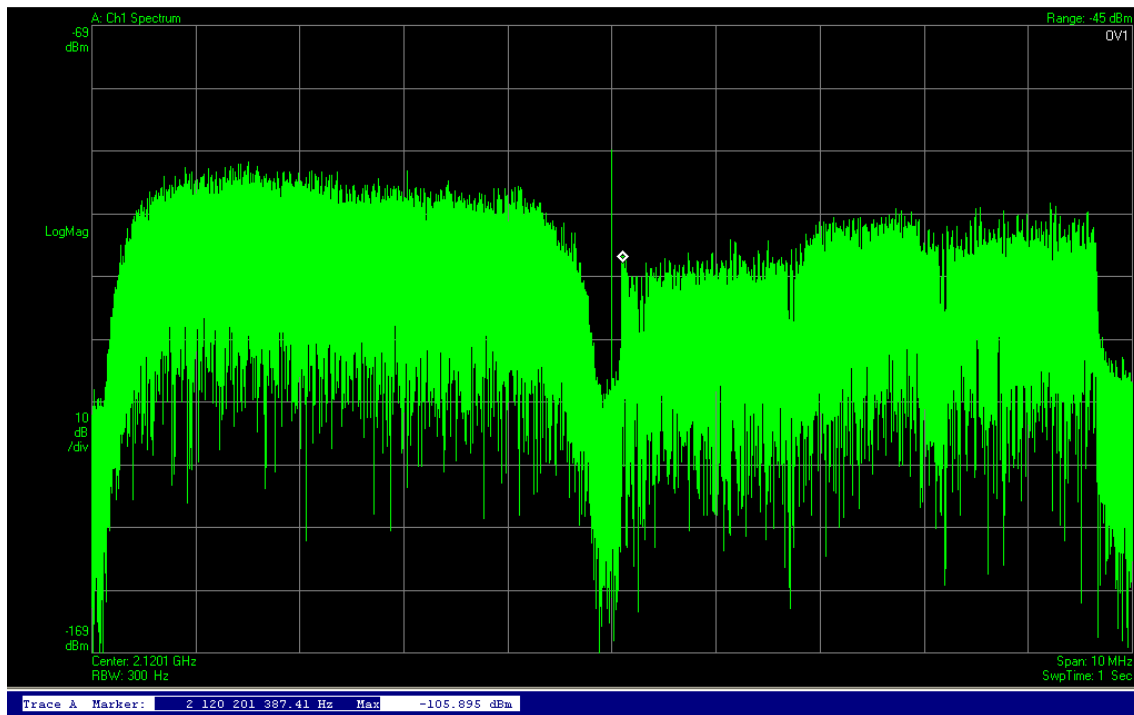


Ilustración 35: Medición osciloscopio NB + BB OFDM

En la gráfica se puede observar que la frecuencia de portadora es de 2,1201 GHz que está situada en el centro. A su izquierda se encuentra una banda de frecuencias en uso por alguna operadora de telecomunicaciones, mientras que a su derecha se encuentran las señales transmitidas en este proyecto ocupando una banda de frecuencias libre.

El puntero blanco está situado sobre la banda estrecha que tiene una potencia aproximada de -105 dBm. Esta es la potencia real y no la que se expone en Labview y tal y como se ha explicado anteriormente, esto se debe al hardware utilizado. A la derecha de la banda estrecha se puede observar la señal OFDM de una forma muy parecida a como se veía en Labview.

Debido a las prestaciones poco aceptables de OFDM, se hace uso de la modulación m-OFDM también generada mediante Openair Interface. En este caso, la señal recibida tiene la siguiente forma:

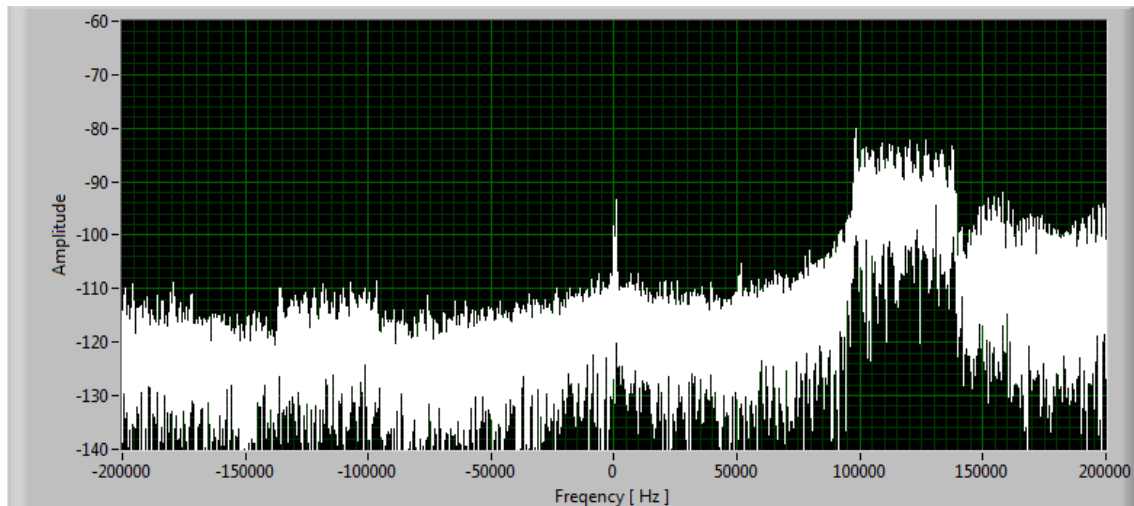


Ilustración 36: Señal NB + BB m-OFDM

En este caso, el límite izquierdo de la señal OFDM se encuentra atenuado tal y como cabría esperarse, de forma que la potencia de la señal NB es mayor.

La constelación recibida en este caso tiene esta forma:

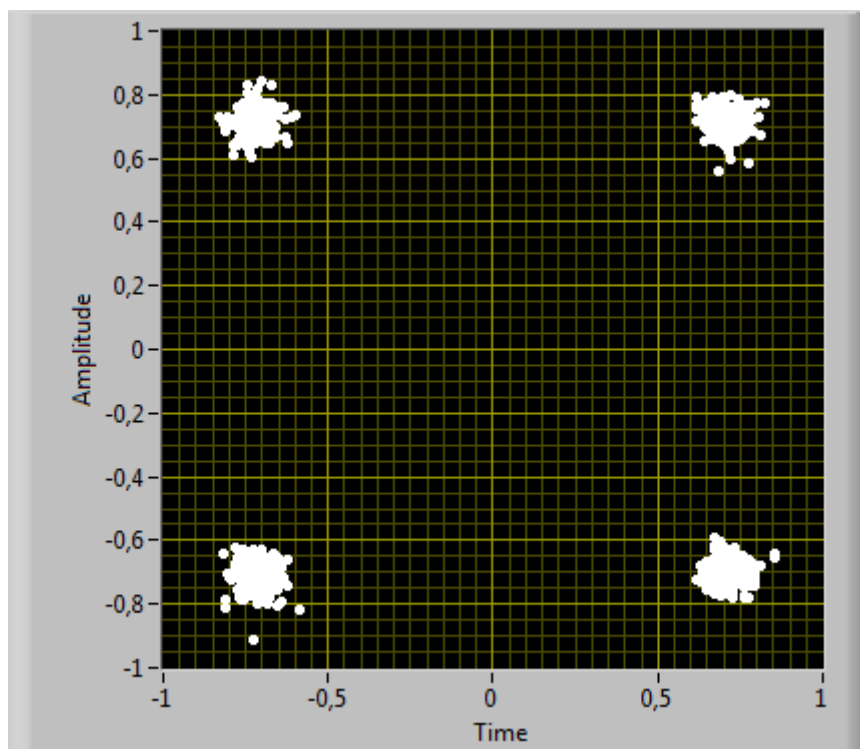


Ilustración 37: Constelación NB + BB m-OFDM

Como se puede observar, en este caso los puntos están más juntos que en el caso en el que se usaba la señal OFDM como interferencia, pero más separados si se compara con la señal NB en solitario.

En este caso, ambas medidas son mejores que en el caso en el que se usaba OFDM pero peores que cuando se transmitía únicamente la NB.

La señal medida con el osciloscopio en este caso tiene el siguiente aspecto:

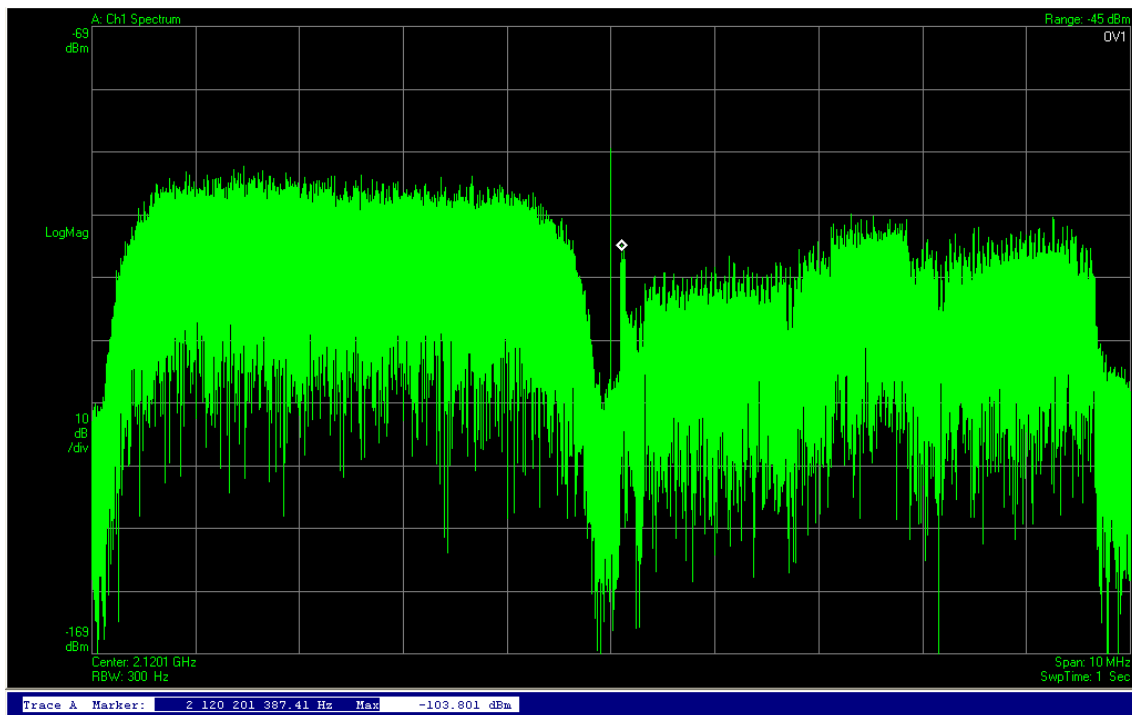


Ilustración 38: Medición osciloscopio NB + BB m-OFDM

En este caso, puede apreciarse como en la zona cercana a la banda estrecha se obtiene la atenuación característica de m-OFDM y como la banda estrecha en este caso (también marcada con el cursor blanco) tiene más potencia que dicho extremo de la m-OFDM.

En los tres casos, debido a que la constelación recibida es bastante buena, tanto la BER como la SER son 0.

5.2. SC-FDMA y UPMC

Dado que la implementación de los transmisores de estas modulaciones se consiguió de manera correcta, fue posible realizar una comparación entre las señales generadas por estas modulaciones y la modulación OFDM.

Por una parte, se realiza una comparación entre las señales SC-FDMA y OFDM transmitidas. En este caso, la señal SC-FDMA viene dada en color naranja mientras que la señal OFDM se muestra en color verde.

Como se puede observar, las señales son prácticamente iguales tal y como cabría esperar en este caso. La potencia alcanzada por ambas señales en este caso es de aproximadamente -45 dBm y se ocupa un ancho total de 2,36111 MHz.

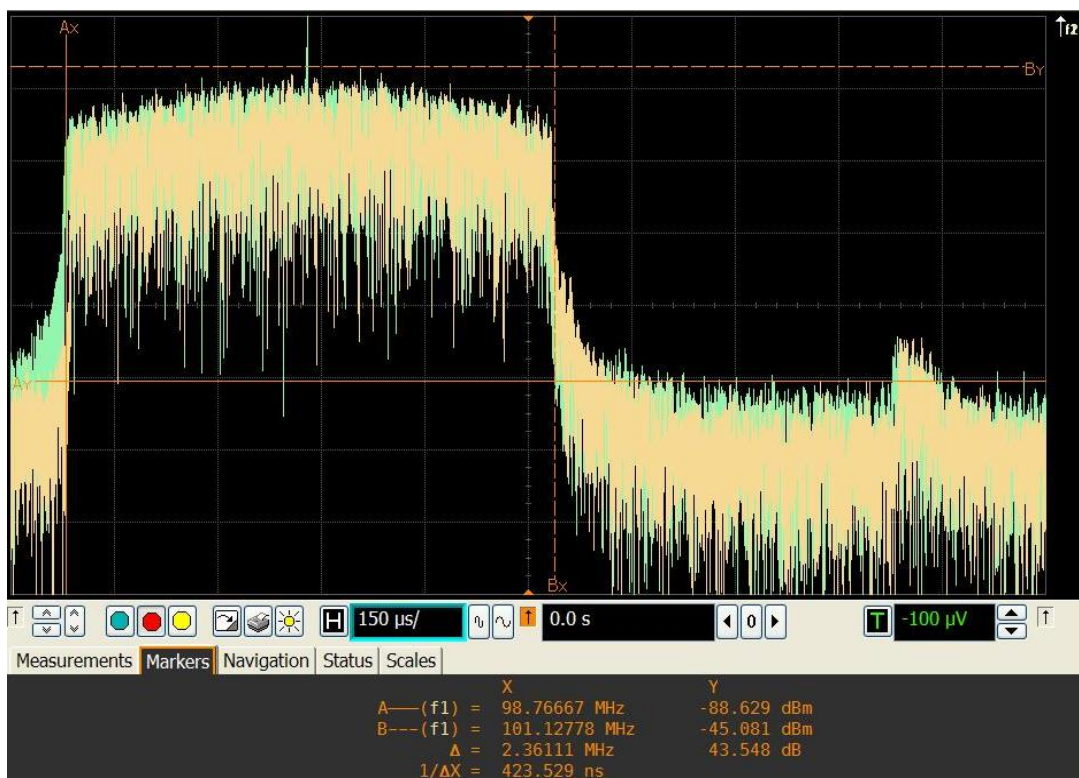


Ilustración 39: Comparación espectro SC-FDMA y OFDM

Por otra parte, se van a comparar las señales UPMC y OFDM. En este caso la señal UPMC viene dada en color naranja mientras que la señal OFDM se muestra en color verde.

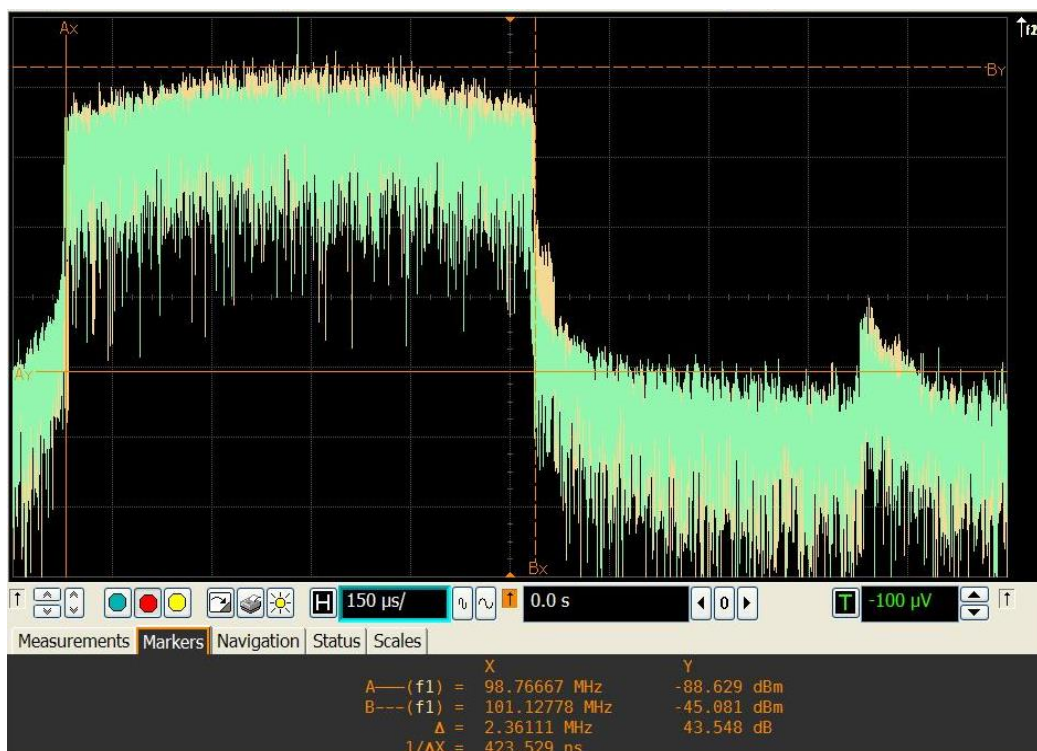


Ilustración 40: Comparación espectro UPMC y OFDM

En este caso, debido al uso de los filtros, se puede ver en el extremo derecho de la señal transmitida que la señal UPMC se atenúa más rápidamente que la señal OFDM. Así mismo, es posible observar que tiene una potencia relativamente mayor debido a la ganancia del filtro.

Para poder diferenciar mejor la atenuación anteriormente mencionada, se utiliza la siguiente gráfica:



Ilustración 41: Comparación espectro UPMC y OFDM 2

En este caso se muestra el extremo derecho de la señal enviada. Como se puede observar, la señal naranja correspondiente a la modulación UPMC se atenúa más rápido. Incluso, se puede observar como para la frecuencia 101,5027 MHz la diferencia de potencia entre ambas señales de 17,186 dB.

La PAPR obtenida para OFDM es de 8,231 dB, para SC-FDMA es de 4,1273 dB y para SC-UPMC es de 3,4948 dB.

5.3. Resultados simulación

5.3.1. Simulación OFDM

En este caso, se ha simulado la transmisión de tres señales OFDM en banda ancha. En todos los casos se ha utilizado un hole de tamaño 1.

En el primer caso se envía una señal con $N=1024$ y $N_{sc}=600$:

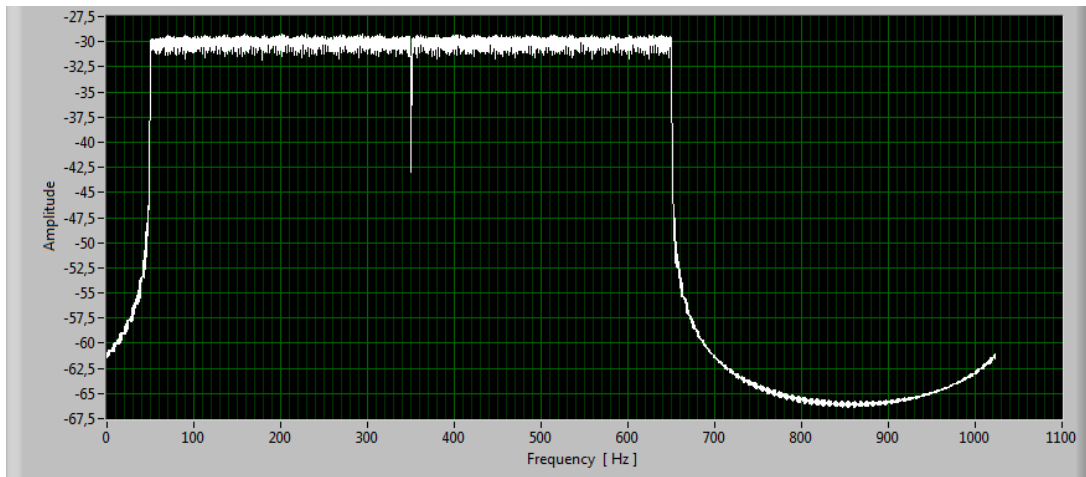


Ilustración 42: Espectro OFDM N=1024 y Nsc=600

En el segundo caso se envía una señal con N=512 y Nsc=300:

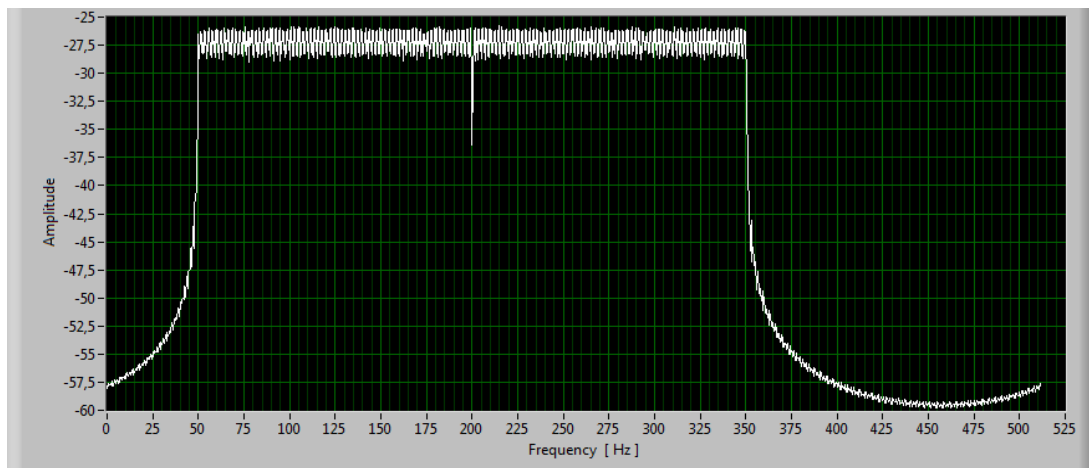


Ilustración 43: Espectro OFDM N=512 y Nsc=300

En el tercer caso se envía una señal con N=256 y Nsc=150:

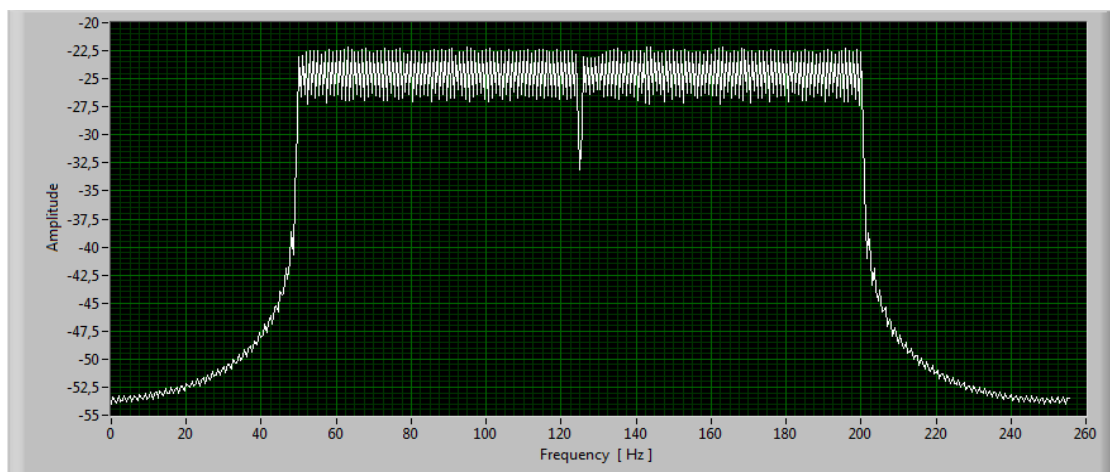


Ilustración 44: Espectro OFDM N=256 y Nsc=150

Como se puede observar, el ancho de banda ocupado disminuye lógicamente y la potencia se ve aumentada.

5.3.2. Simulación SC-FDMA

En este caso, se ha simulado la transmisión de una señal SC-FDMA en banda ancha junto a una señal SC-FDMA en banda estrecha separadas por 1 portadora. La constelación utilizada es una 16-QAM.

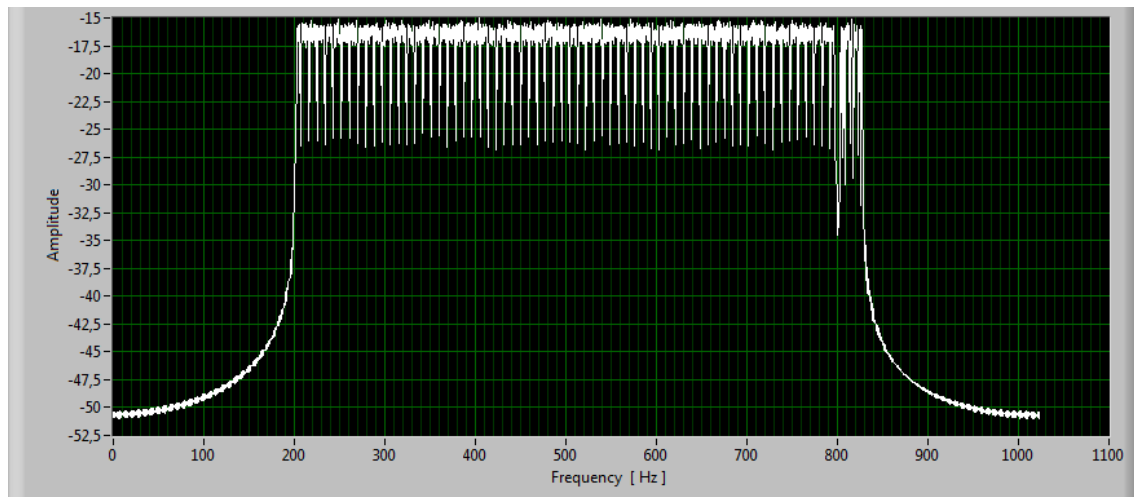


Ilustración 45: Simulación SC-FDMA

En recepción se demodula la señal en banda ancha y como se puede observar, la constelación se recibe correctamente.

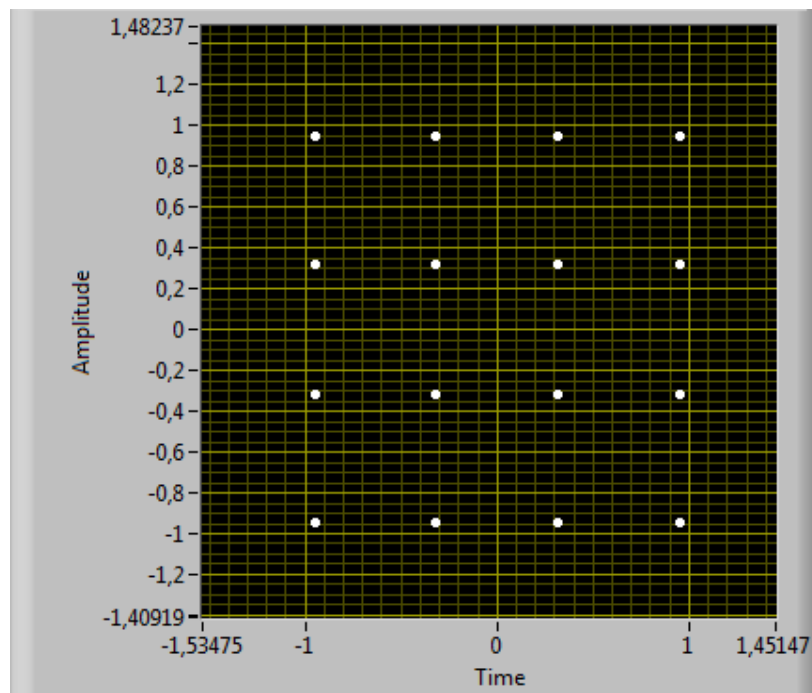


Ilustración 46: Constelación SC-FDMA

5.3.3. Simulación SC-UFMC

En este caso, se ha simulado la transmisión de una señal SC-UFMC en banda ancha junto a una señal SC-UFMC en banda estrecha separadas por 1 portadora. La constelación utilizada es una 16-QAM.

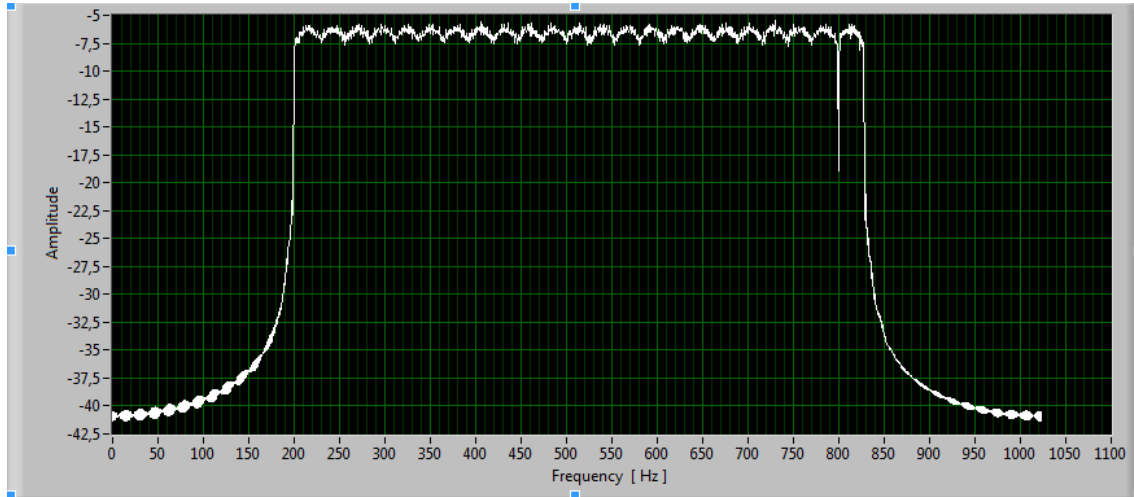


Ilustración 47: Simulación SC-UFMC

En recepción se demodula la señal en banda ancha, y como se puede observar la constelación se recibe correctamente. Además, puede verse el efecto de los filtros, que atenúan los extremos de los bloques.

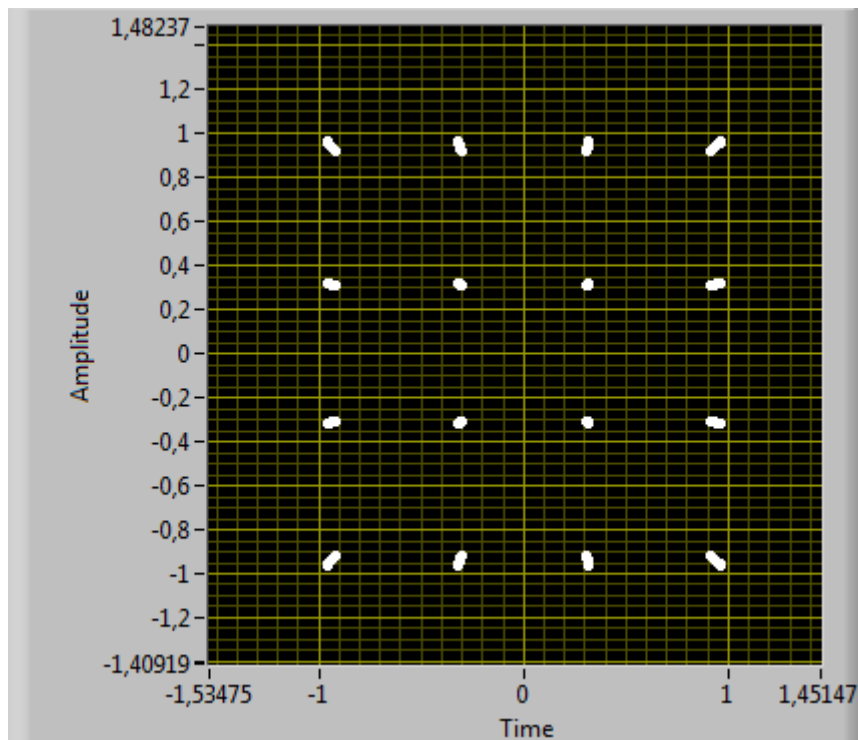


Ilustración 48: Constelación SC-UFMC

CAPÍTULO 6: CONCLUSIÓN, LINEAS DE TRABAJO FUTURAS Y DIFICULTADES

6.1. Conclusiones

El mundo de las comunicaciones móviles avanza con una rapidez increíble y por ello es necesario encontrar técnicas que satisfagan unas prestaciones determinadas que cada vez son más exigentes.

Como se ha podido observar, OFDM presenta ciertos inconvenientes, y por ellos se buscan alternativas tales como m-OFDM o UFMC. A partir de los resultados, se ha podido ver cómo, efectivamente, las prestaciones utilizando m-OFDM son mejores que las de OFDM en general, y a la hora de generar una señal NB-IoT en particular.

Así mismo, se ha podido observar como UFMC/SC-UFMC, debido al uso de los filtros, consigue una atenuación mayor que OFDM/SC-FDMA en los extremos, lo que reduce las interferencias y mejora la calidad de la señal recibida.

Finalmente, se ha podido constatar que la PAPR de OFDM es más grande que la de SC-FDMA utilizada en el enlace ascendente precisamente por su baja PAPR. También se pudo constatar que la PAPR para SC-UFMC es menor que en el caso de SC-FDMA tal y como cabría esperar.

6.2. Líneas de trabajo futuras

Las principales líneas de trabajo futuras se centrarán en la implementación de los sistemas SC-FDMA, UFMC y SC-UFMC completos de forma real. Esto pasará por conseguir una buena sincronización en todos los casos así como desarrollar los distintos bloques necesarios para detectar la señal en el caso de las modulaciones UFMC y SC-UFMC debido a su falta de CP.

Además, se intentará reducir al máximo el tamaño de la FFT/IFFT para todas las modulaciones buscando poder aplicar una frecuencia de muestreo superior y así aumentar la eficiencia del uso de las bandas por parte de las subportadoras.

Finalmente, se seguirán estudiando distintas modulaciones para poder implementarlas y desarrollar sistemas de comunicaciones móviles cada vez más eficientes y con unas mejores prestaciones.

6.3. Dificultades

Las primeras dificultades surgen con la instalación de Openair Interface. Debido a que se trata de un programa muy novedoso el soporte es muy poco y por tanto los problemas que surgen son muchos. Incluso habiendo hecho la configuración tal y como se expone en la guía del programa, la instalación del programa conllevó mucho tiempo. Finalmente, tras revisar detenidamente la guía ofrecida se consiguió instalar y se comprobó su correcto funcionamiento.

Otra de las dificultades fue la creación del filtro a usar en UFMC. Las variaciones sufridas por un cambio en el tamaño del filtro o en su atenuación fueron muy notables, y por ello, fue necesario refinar al máximo los parámetros del filtro. Además, dicho filtro se crea mediante

Matlab y el proceso por el cual pasa a Labview es muy lento, lo que acentuó los problemas sufridos.

Los problemas de sincronización tanto para SC-FDMA como para UFMC son muy comunes y provoca que los símbolos no se detecten correctamente. Muchas modificaciones se llevaron a cabo para poder solventar este problema.

Además, surgieron numerosos problemas a la hora de realizar el experimento real. Debido a problemas de los USRPs o de los ordenadores, en numerosas ocasiones no se conseguía detectar la señal enviada o se introducían interferencias externas aumentando por tanto la cantidad de errores.

Finalmente, la principal dificultad fue comprender la teoría de las diferentes modulaciones. Dado que no se cursó ninguna asignatura de comunicaciones móviles los conocimientos sobre estas modulaciones fue nulo. Se necesitó mucho tiempo e investigación y de lectura para poder entender los conceptos e implementarlos posteriormente de la manera adecuada.

CAPÍTULO 7: MARGO REGULADOR, IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO Y PRESUPUESTO

7.1. Entorno socio-económico

7.1.1. Presupuesto y costes

En este apartado se va a analizar el coste total del proyecto, teniendo en cuenta el coste del material y el coste del trabajo personal.

7.1.1.1. Coste del material

En este coste se incluyen todos aquellos costes asociados a las herramientas, los equipos, y los programas utilizados así como otro tipo de gastos indirectos (luz, Internet, etc.). Dentro de estos costes se tiene en cuenta la amortización que viene dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{A}{B}CD$$

Donde A es el número de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado, B es el periodo de depreciación (60 meses), C es el coste del equipo y D el porcentaje de uso que se le dedica al proyecto.

En la tabla que se expone a continuación se van a mostrar todos estos costes asociados a los materiales:

Material	Coste (€)	% dedicado proyecto	Uso	Duración (meses)	Periodo depreciación (meses)	Coste imputable (€)
5 PCs Intel Core i5	2895	100		12	60	579
2 NI USRP-2920	6406	100		12	60	1281,2
1 Memoria USB 16 GB	6,50	100		12	60	1,3
1 Osciloscopio Infinium DSO90604A	1857,50	100		12	60	371,5
1 NI USRP-B210	1351	100		12	60	270,2
2 Antenas 2,2 GHz	35,50	100		12	60	7,1
2 Antenas VERT900	40	100		12	60	8
1 Tarjeta SIM	8,1	100		12	60	1,62
1 Analizador	4550	100		12	60	910

de señales VSA 89600					
1 Xiaomi MI3	160,35	100	12	60	32,07
Otros gastos	300	100	12	-	3600
TOTAL					7061,99

Tabla 1: Coste del material

7.1.1.2. Coste del personal

El personal que ha participado en este proyecto está compuesto por el alumno y el tutor.

En el caso del alumno, se ha tenido en cuenta un salario medio de 10€/hora que es el salario promedio de un ingeniero junior de telecomunicaciones. Teniendo en cuenta que el alumno ha trabajado 10 horas semanales durante 52 semanas, el sueldo final es de 5200€.

En el caso del tutor, se ha tenido en cuenta un salario medio de 20€/hora que es el salario promedio de un ingeniero senior de telecomunicaciones. Teniendo en cuenta que el tutor ha trabajado un total aproximado de 50 horas, el sueldo final es de 1000€.

Por tanto, el coste del personal total es de 6200€.

7.1.1.3. Coste total

Una vez analizados los costes del personal y de los materiales, es preciso obtener el coste total. Para ello, se ha de tener en cuenta el IVA que se considera del 20%.

Coste materiales	7061,99€
Coste personal	6200€
Costes indirectos (20%)	2652,4€
Coste total	15914,39€

Tabla 2: Coste total

7.1.2. Impacto socio-económico

Debido al auge de las comunicaciones móviles y al creciente interés de los usuarios en las nuevas tecnologías, el impacto que puede tener este proyecto es muy grande.

Al encontrar modulaciones que permiten simplificar la arquitectura de los sistemas de comunicaciones se consigue reducir los costes de su implementación manteniendo unos resultados muy parecidos e incluso mejores. Además, como se ha podido observar, es posible aumentar la eficiencia espectral mediante UFMC eliminando la necesidad de usar un CP.

En LTE, como ya se mencionó, se utiliza OFDM y SC-FDMA en los enlaces de bajada y subida respectivamente. Las nuevas modulaciones estudiadas m-OFDM y UFMC pueden aplicarse al

enlace de bajada mientras que SC-UFMC puede aplicarse al enlace de subida. De esta manera, se pueden alcanzar velocidades de transmisión superiores con unas pérdidas inferiores tal y como se busca obtener mediante las nuevas generaciones de sistemas de comunicaciones móviles 4G y 5G.

Todo esto se traduce en una reducción de los costes y en un aumento de las prestaciones lo que resulta muy interesante para los operadoras de telecomunicaciones que están buscando tecnologías cada vez más eficientes que puedan explotar.

Esta reducción de los costes por parte de las operadoras puede tener un impacto tanto positivo como negativo en los usuarios.

Por una parte, las operadoras podrían aumentar los precios de las tarifas alegando que se ofrece una tecnología más avanzada con unas prestaciones mejores. Pero por otra parte, tal y como se ha observado a lo largo de la historia, el precio de estas mejoras suele descender progresivamente. Por tanto, a la larga, los usuarios podrían disfrutar de estas mejores prestaciones a un precio accesible.

7.2. Marco regulador

Al ocupar una banda de frecuencias real para el desarrollo del proyecto, es necesario tener en cuenta una serie de reglas.

Por una parte, se necesita asegurar que la banda de frecuencias ocupadas está libre ya que es posible generar interferencias perjudiciales ocupando bandas de frecuencias en uso. Por ello, es importante establecer unas bandas de guarda. Además, para poder hacer uso de esta banda de frecuencias es necesario que se asigne por una administración para que se haga una gestión eficiente del espectro radioeléctrico.

La entidad que se encarga de la armonización en la gestión del espectro es el **Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones o International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R)**. Su función es la de garantizar la utilidad racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los que emplean órbitas satelitales, así como la de realizar estudios y adoptar Recomendaciones sobre las Radiocomunicaciones.

La ITU-R es la encargada de la redacción del **Reglamento de Radiocomunicaciones**, que, con carácter de **Tratado Internacional**, sirve de texto básico para la regulación del espectro radioeléctrico en casi la totalidad de los países. Este Reglamento sólo puede ser modificado en las **Conferencias Mundiales de Radiocomunicación (CMR)** que se celebran cada dos o tres años.

A nivel europeo, la armonización del espectro es llevada a cabo por la **Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT)**, mientras que en España, la **Autoridad Nacional de Reglamentación (ANR)** que se encarga de esto es el **Ministerio de Industria, Energía y Turismo**. Esta ANR hace uso del **Centro Nacional de Atribución de**

Frecuencias (CNAF) que se encarga de la atribución de las bandas de frecuencias, indicando a que servicios se dedican las distintas bandas.

Estas ANR se encargan de aplicar políticas nacionales de comunicaciones fomentando la competencia en el ámbito de las comunicaciones, contribuir al desarrollo del mercado interior de las comunicaciones electrónicas y promover los intereses de los ciudadanos.

La **Comisión Europea** establece el **Grupo de entidades reguladoras europeas** mediante su Decisión 2002/627/CE de 29 de julio de 2002, para velar por el desarrollo de una práctica reguladora coherente y por la aplicación coherente del marco regulador de la **Unión Europea** (UE) y además, para facilitar la comunicación entre las ANR y la Comisión.

Posteriormente, en el año 2009 se crea el **Organismo de Reguladores Europeos de las Comunicaciones Electrónicas** (ORECE) o **Body of European Regulators for Electronic Communication** (BEREC) para reforzar al Grupo.

En lo referente a la ley que regula las telecomunicaciones a nivel nacional y, por tanto, afecta a este proyecto, se trata de la **Ley 9/2014** del 10 de mayo. Esta Ley deroga la anterior **Ley General de Telecomunicaciones** (LGT) 32/2003. Su objetivo es mejorarla libre competencia y facilitar la inversión. Además, a diferencia de la LGT 32/2003, busca facilitar el despliegue de nuevas redes y mejorar los servicios innovadores para los ciudadanos y el abaratamiento de los mismos.

La autorización de publicación de la memoria por parte de la universidad se puede incluir dentro de las cuestiones relativas a la propiedad intelectual. Los TFG están protegidos por la **Ley de Propiedad Intelectual** (Real Decreto Legislativo 1/1996, 12 abril), y en su caso por la **Ley de patentes** (Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes). Por tanto, la titularidad de los derechos de propiedad intelectual de los TFG pertenece a los estudiantes que los hayan realizado.

Sin embargo, suele ser habitual que el autor autorice a la Universidad para la consulta, difusión y/o exposición pública del trabajo, sin ánimo de lucro y sin menoscabo de los derechos de autor y que en el caso de publicación del trabajo, hacerse constar el tutor y el origen y función original del trabajo.

Referencias

- [1] [REVIEW] Benchmarks Análisis del Redmi Note LTE (4G) by Faralai. (2017). Miui.es. Retrieved 25 September 2017, from <http://miui.es/index.php?topic=12745.0>
- [2] 3GPP. (2017). 3gpp.org. Retrieved 25 September 2017, from <http://www.3gpp.org/>
- [3] Chen Hu, K., Pera, G., & García Armada, A. (2017). Comparison of 5G candidate multi-carrier waveforms in a hardware testbed.
- [4] Cho, Y. (2011). MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. Singapore [u.a]: Wiley.
- [5] Eshwaraiah, H., & Chockalingam, A. (2017). SC-FDMA for Multiuser Communication on the Downlink.
- [6] FONSECA ARBOLEDA, R. (2012). IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN EN UN DISPOSITIVO RADIO.
- [7] Hanta, B. (2009). SC-FDMA and LTE Uplink Physical Layer Design.
- [8] Herbert, D. (2003). Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
- [9] Historia de las telecomunicaciones. (2017). Es.wikipedia.org. Retrieved 25 September 2017, from https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_las_telecomunicaciones
- [10] Kodheli, O. (2016). OFDM-based Schemes for Next Generation Wireless Systems (Master). Universit  de Bologna.
- [11] Kumar, P., & Kishore, K. (2016). BER and PAPR Analysis of UPMC for 5G Communications.
- [12] LTE - the Umts Long Term Evolution. (2015). Chicester.
- [13] Muñoz Morales, C. (2013). Análisis de Desempeño de un Sistema MIMO-OFDM con Predicción de Canal. Universidad Nacional de Colombia.
- [14] NarrowBand IOT. (2017). En.wikipedia.org. Retrieved 25 September 2017, from https://en.wikipedia.org/wiki/NarrowBand_IOT
- [15] Rahman, M., Das, S., & Marchetti, N. (2009). Single- and Multi-Carrier MIMO Transmission for Broadband Wireless Systems. River Publishers.
- [16] TFG - A quién pertenecen los derechos de propiedad intelectual - Fdiwiki ELP. (2017). Wikis.fdi.ucm.es. Retrieved 25 September 2017, from http://wikis.fdi.ucm.es/ELP/TFG_-_A_qui n_pertenecen_los_derechos_de_propiedad_intelectual
- [17] The "Perfect Simulation" for Wireless Receiver Test - National Instruments. (2017). Ni.com. Retrieved 25 September 2017, from <http://www.ni.com/white-paper/6427/en/>

- [18] Uncategorized – Electrónica Celular. (2017). Electronicacelular.com. Retrieved 25 September 2017, from <https://electronicacelular.com/archives/category/uncategorized>
- [19] What is CP (Cyclic Prefix) in LTE? - telecomHall. (2017). Telecomhall.com. Retrieved 25 September 2017, from <http://www.telecomhall.com/what-is-cp-cyclic-prefix-in-lte.aspx>
- [20] Witrisal, K. (2002). OFDM air-interface design for multimedia communications. [S.l.: s.n.].

Summary

Project description

Communication has been essential for the human being throughout history. From prehistory to the present, communication has played a very important role in various areas such as commerce, the military, or education. As time passed, there appeared certain challenges or difficulties such as allowing communication when the sender or receiver are in motion or allowing communication at great distances. This led to the development of mobile communication systems based on radio communication.

Due to the increase in the number of mobile phone users, there is an obligation to evolve communication systems to satisfy their needs. Long Term Evolution (LTE) appears as an option to fulfill this mission. LTE uses the **Orthogonal Frequency Division Multiplexing** (OFDM) modulation for its downlink and the **Single-carrier FDMA** (SC-FDMA) modulation for its uplink.

In this thesis we will perform an implementation and simulation of the modulations used in LTE and, in addition, we will also analyze the **Universal Filtered Multi-Carrier** (UFMC), the **Single Carrier UFMC** (SC-UFMC) and a modulation derived from OFDM, the **Masked OFDM** or m-OFDM. We will need to use several **Universal Software Radio Peripheral** (USRP) by National Instruments. Two USRPs will be used: one in transmission and one in reception.

First, we will make an improvement to an implementation of the OFDM and m-OFDM modulations which are already done. This improvement consists of using the Openair Interface program to send a broadband signal by adding it to a narrowband (NB) signal generated by Labview and transmit that signal using one of the USRPs. In this way, a **NarrowBand IOT** (NB-IoT) modulation is achieved.

In this way, the broadband previously generated by Labview and transmitted by another USRP is replaced by an OFDM or m-OFDM signal generated with Openair. Subsequently, the results obtained with both modulations will be compared.

In order to do this, it is necessary to generate the typical LTE architecture using Openair Interface on two computers and deploy a network. In addition, in order to check the functionality of this network we will connect a mobile device through a pre-recorded SIM card and we will check that internet access is possible.

In addition to this, it will be possible to reduce the size of the FFT / IFFT applied which increases the sampling rate and, consequently, the bandwidth of the subcarriers.

As for the SC-FDMA, SC-UFMC and UFMC modulations, the transmitter implementation is performed and a USRP is used to transmit those signals through Labview. Subsequently, a comparison will be made between said broadband transmitted signals with an OFDM broadband signal, analyzing the differences.

At the simulation level, it will be possible to use two different constellations: 4-QAM and 16-QAM (**Quadrature Amplitude Modulation**), and simulations will be performed for OFDM, SC-FDMA, SC-UFMC and UFMC.

The performance of the three modulations for the different constellations will be analyzed, as well as the effect of reducing the size of the FFT / IFFT applied in OFDM. In addition, the main blocks of the programmed code will be explained.

Finally, the **Peak-to-Average Power Ratio** (PAPR) will be measured on the transmitter and the **Bit Error Rate** (BER) and **Symbol Error Rate** (SER) will be measured on the receiver. In the first case it will be done for the OFDM, SC-FDMA and SC-UFMC modulations, and in the second case it will be done for the improvement applied to OFDM and m-OFDM.

Goals

Due to the amount of modulations of both the signal and the bits there are several goals. The first goal is to implement all the blocks necessary to make the physical connection between the USRPs. This involves writing a code using Labview so that the USRPs can transmit and receive data through the antennas.

The second goal is to implement the blocks that are needed for the modulation of the transmitted data within the same code previously created. It will be necessary to implement the modulation of the bits according to which constellation is desired (4-QAM or 16-QAM), the insertion of the pilots or the addition of the **cyclic prefix** (CP) among others. In addition, depending on the modulation used, more or fewer blocks must be made.

For example, in the case of the SC-FDMA and SC-UFMC modulations, a block that performs the **Fast Fourier Transform** (FFT) must be added for each of the users. Moreover, in the case of SC-UFMC and UFMC, the appropriate filter must be generated using Matlab and shifted in frequency depending on the frequency band where the user is located.

The third goal will be to generate the receiver and adapt it according to the modulation used. It will be necessary to implement all the necessary blocks for the synchronization, the detection, the decoding of the data, the demodulation or the estimation of the channel among others. Also, it will be needed to generate the blocks that compute the SER and the BER of all the possible combinations described previously.

The fourth goal is using Openair Interface in order to generate the broadband signal for the OFDM and m-OFDM modulations and to perform the same experiments mentioned above, also calculating the BER and the SER.

The fifth goal is to make a clear, simple and complete implementation that satisfies the requirements and is easy to understand and intuit.

Finally, the last goal will be to obtain acceptable results in terms of BER and SER in all cases, as well as to make a comparison between all possible combinations.

Gantt diagram

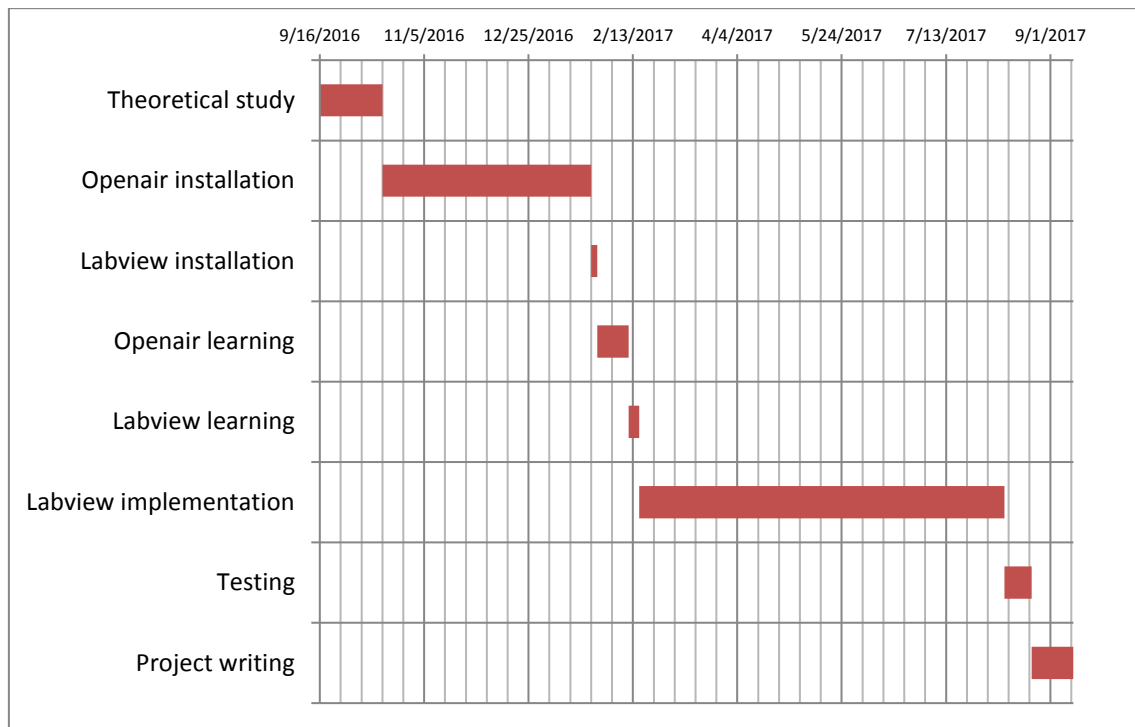


Ilustración 49: Gantt diagram

Project structure

-Chapter 1: Introduction

This chapter is an introduction to the project developed. It includes a brief summary of the history of telecommunications until reaching LTE, the motivation of the work, as well as the objectives to be achieved. Also, it presents a Gantt diagram explaining the planning carried out and describes the structure followed when writing the memory.

-Chapter 2: Analysis of waveforms

This chapter will explain all the theory related to OFDM, m-OFDM, NB-IoT, SC-FDMA, UFMC and SC-UFMC, their origins, their applications, their weaknesses, as well as the structure of the communication systems based on these modulations.

-Chapter 3: Openair Interface

In this chapter we will analyze the installation of Openair Interface, the LTE architecture implemented, as well as other issues related to this program.

-Chapter 4: Code, simulation and implementation

This chapter will show the main blocks of the code developed for the different modulations, and explain which are the implementations and simulations that were made.

-Chapter 5: Results

In this chapter we will analyze the results obtained with the improvement developed using Openair Interface and they will be compared with the previous results, the SC-FDMA and SC-UFMC modulations spectrums will be compared with the OFDM spectrum, and finally the results of the simulations will be shown.

-Chapter 6: Conclusions, future lines of work and difficulties

This chapter will discuss the conclusions drawn from the results obtained, as well as future work lines based on this project. Finally, the main difficulties encountered throughout the project will be presented.

-Chapter 7: Regulatory framework, socio-economic impact and budget

This chapter will deal with the regulatory framework of work, its socio-economic impact and the budget necessary to carry it out.

Conclusions

The world of mobile communications is advancing with incredible speed and therefore it is necessary to find techniques that satisfy certain services that are becoming more demanding.

As we have seen, OFDM has certain drawbacks, and professionals are looking for alternatives such as m-OFDM or UFMC. From the results, it has been possible to see how, effectively, the performances using m-OFDM are better than those of OFDM in general, and when generating a NB-IoT signal in particular.

Also, it has been observed that UFMC / SC-UFMC, due to the use of the filters, achieves a greater attenuation than OFDM / SC-FDMA at the ends, which reduces interference and improves the quality of the received signal.

Finally, it has been found that the OFDM PAPR is greater than the SC-FDMA used in the uplink precisely because of its low PAPR. It was also found that the PAPR for SC-UFMC is lower than in the case of SC-FDMA as might be expected.

Future lines of work

The main future lines of work will focus on the implementation of the complete SC-FDMA, UFMC and SC-UFMC systems. This will happen if a good synchronization in all the cases will be achieved as well as developing the different blocks needed to detect the signal in the case of UFMC and SC-UFMC modulations due to their lack of CP.

In addition, an attempt will be made to minimize the size of the FFT / IFFT for all modulations by seeking to apply a higher sampling frequency so as to increase the efficiency of the use of the bands by the subcarriers.

Finally, different modulations will be studied in order to implement them and to develop increasingly efficient mobile communications systems with better performance.

Difficulties

The first difficulties arise with the installation of Openair Interface. Because it is a very new program, the support is very little and therefore the problems that arise are many. Even having done the configuration as outlined in the program guide, the installation of the program took a lot of time. Finally, after carefully reviewing the guide offered, it was possible to install and checked its correct operation.

Another difficulty was the creation of the filter used in UPMC. The variations suffered by a change in the size of the filter or its attenuation were very remarkable, and therefore, it was necessary to refine the filter parameters to the maximum. In addition, this filter is created by Matlab and the process by which it passes to Labview is very slow, which accentuated the problems suffered.

Synchronization problems for both SC-FDMA and UPMC are very common and cause symbols to not be detected correctly. Many modifications were made to solve this problem.

In addition, numerous problems arose at the time of the actual experiment. Due to problems of the USRPs or computers, in many cases the signal sent could not be detected or external interferences were introduced, thus increasing the number of errors.

Finally, the main difficulty was to understand the theory of the different modulations. Since no subjects of mobile communications were studied the knowledge about these modulations was null. It took a lot of time and research and reading to be able to understand the concepts and then implement them in the right way.

Material cost

This cost includes all costs associated with the tools, equipment, and programs used as well as other indirect costs (light, Internet, etc.). Within these costs, the amortization given by the following formula is taken into account:

$$\frac{A}{B}CD$$

Where A is the number of months from the billing date in which the equipment is used, B is the depreciation period (60 months), C is the cost of the equipment and D is the percentage of use that is devoted to the project.

The following table shows all these costs associated with the materials:

Material	Cost (€)	%Use dedicated project	Span (months)	Depreciation period (months)	Imputable cost (€)
5 PCs Intel Core i5	2895	100	12	60	579
2 NI USRP-2920	6406	100	12	60	1281,2
1 USB Memory 16 GB	6,50	100	12	60	1,3
1 Oscilloscope Infinium DSO90604A	1857,50	100	12	60	371,5
1 NI USRP-B210	1351	100	12	60	270,2
2 Antennas 2,2 GHz	35,50	100	12	60	7,1
2 Antennas VERT900	40	100	12	60	8
1 SIM Card	8,1	100	12	60	1,62
1 Signal analyzer VSA 89600	4550	100	12	60	910
1 Xiaomi MI3	160,35	100	12	60	32,07
Other expenses	300	100	12	-	3600

TOTAL					7061,99
-------	--	--	--	--	---------

Tabla 3: Material cost

Staff cost

The staff that has participated in this project is composed of the student and the tutor.

In the case of the student, an average salary of 10 € / hour is taken into account, which is the average salary of a junior telecommunications engineer. Taking into account that the student has worked 10 hours a week for 52 weeks, the final salary is 5200 €.

In the case of the tutor, an average salary of € 20 / hour is taken into account, which is the average salary of a senior telecommunications engineer. Taking into account that the tutor has worked a total of approximately 50 hours, the final salary is 1000 €.

Therefore, the total staff cost is € 6200.

Total cost

Once the costs of staff and materials have been analyzed, the total cost must be obtained. To do this, we must take into account the VAT that is considered to be 20%.

Material cost	7061,99€
Staff cost	6200€
Indirect cost(20%)	2652,4€
Total cost	15914,39€

Tabla 4: Total cost

Socio-economic impact

Due to the rise of mobile communications and the growing interest of users in new technologies, the impact of this project is very large.

Finding modulations that simplify the architecture of communications systems can reduce the costs of implementation while maintaining results that are very similar or even better. In addition, as it has been observed, it is possible to increase the spectral efficiency using UPMC eliminating the need to use a CP.

In LTE, as already mentioned, OFDM and SC-FDMA are used in the downlink and uplink respectively. The new modulations studied m-OFDM and UFMC can be applied to the downlink while SC-UFMC can be applied to the uplink. In this way, higher transmission rates can be achieved with lower losses as intended by the new generations of 4G and 5G mobile communications systems.

All this translates into a reduction of costs and an increase of the benefits which is very interesting for the telecommunications operators who are looking for technologies increasingly efficient that they can exploit.

This reduction of the costs by the operators can have a positive and negative impact on the users.

On the one hand, operators could increase tariffs on the grounds that more advanced technology is offered with better performance. But on the other hand, as it has been observed throughout history, the price of these improvements usually decreases progressively. Therefore, in the long run, users could enjoy these better services at an affordable price.